

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra fyzikální chemie a teorie technologických pochodů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální stanovení relativní rychlosti dvojice bublin unášených
v protiproudu kapaliny

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Alice Štvrtněová**

Studijní program: N3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: 2807T004 Chemické inženýrství

Téma: **Experimentální stanovení relativní rychlosti dvojice bublin
unášených v protiproudu kapaliny**

**Experimental study of bubble pair relative velocity in counter
current flow of liquid**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do fyzikální chemie a transportních procesů přenosu hmoty a hybnosti, základní pojmy a definice (povrchové napětí, vodivost, viskozita, experimentální metody jejich stanovení).
2. Literární rešerše na zadané téma.
3. Experimentální práce:
 - sestavení pokusné aparatury v laboratorním měřítku
 - ověření vhodnosti detekčních metod
 - navržení metodiky vedení pokusu
 - dokončení zpracování primárních dat (image processing, postprocessing).
4. Vyhodnocení experimentálních dat a jejich inženýrské korelace.
5. Srovnání experimentálních dat s literaturou.
6. Zpracování výsledku prostředky Matlab a MS Office do publikovatelné podoby.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] PERRY, R.H., GREEN, D.W. Perry's chemical engineers' handbook. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [2] CLIFT, R., et. al. Bubbles, drops, and particles. Dover Publications, reprint, 2005.
- [3] VEČEŘ, M., LEŠTINSKÝ, P., WICHTERLE, K., RŮŽIČKA, M.C. On Bubble Rising in Countercurrent Flow. International Journal of Chemical Reactor Engineering 10. A30. 2012. DOI: 10.1515/1542-6580.2995.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Kamil Wichterle, DrSc.**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 10.8.2016

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání DP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část DP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran a celkový rozsah DP bude min. 45 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno.

Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Touto cestou bych ráda poděkovala panu doc. ing. Marku Večeřovi, PhD. za odborné úvodní seznámení s danou problematikou, paní mgr. Zuzaně Morávkové, Ph.D. za pomoc a seznámení s pracovním prostředím programu MatLab, a panu prof. ing. Kamilu Wichterlemu, DrSc. za odbornou pomoc při dokončení této práce. Dále bych chtěla poděkovat paní děkance prof. ing. Janě Dobrovské, CSc. a paní tajemnici ing. Simoně Zlé, Ph.D. bez jejichž ochoty a podpory by nebylo možné tuto práci dokončit. Velké poděkování chci také věnovat své rodině a nejbližším přátelům za jejich podporu.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na studium dvoufázového systému, konkrétně na chování dvojice stejně velkých plyných bublin v protiproudu kapaliny. Teoretická část je zaměřena na popis bezrozměrných kritérií, jež bývají využita k popisu dvoufázového systému, a dále na popis faktorů, které tento systém ovlivňují a jakým způsobem. V experimentální části je rozebrána realizace měření, která byla provedena na originální aparatuře, jejíž hlavní částí je skleněný kuželovitý kanál. V tomto kanále byl vysokorychlostní digitální kamerou zaznamenán pohyb dvojice bublin v rozličných kapalinách. Obrazovou analýzou pořízeného digitálního záznamu byly získány exaktní pozice dvojice bublin. Ze souřadnic výskytu každé bubliny byly následně počítány vybrané klíčové vlastnosti pozorovaného systému – radiální a vertikální vzdálenost dvojice bublin a jejich vzájemná relativní rychlost. Výsledkem experimentální části jsou mapy hustot pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin a grafy znázorňující změnu relativní rychlosti dvojice bublin v závislosti na jejich radiální a vertikální vzdálenosti.

Klíčová slova

Dvojice bublin, relativní rychlost dvojice bublin, protiproud kapaliny, digitální vysokorychlostní kamera.

Abstract

The thesis is focused on the behaviour of two-phase flow, specifically on the interaction of an equally large pair of gas bubbles in liquid counter-current flow. The theoretical part is oriented on dimensionless numbers as the way to describe a two-phase flow system and also the factors affecting the system. The realization of the experiments is described in the experimental part. Experiments were carried in a glass conical tube as a part of the original apparatus. The movement of bubbles in different liquid was recorded on a high speed digital camera. The following image analysis provided us with the exact position of the tracked bubbles. The key aspects (radial and vertical distance, bubble pair relative velocity) are calculated from these coordinates. The results of the experimental part are presented as the maps showing the probability density function of the relative individual position of a pair of bubbles and graphs presenting the relative velocity of a pair of bubbles reliance on bubbles relative and vertical distance.

Keywords

Pair of Bubbles, Bubble Pair Relative Velocity, Counter-current Flow, High Speed Digital Camera

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce.....	3
3	Teoretická část	4
3.1	Bezrozměrná kritéria	4
3.1.1	Odporový koeficient	10
3.2	Fyzikálně chemické vlastnosti tekutiny a experimentální metody jejich stanovení..	12
3.2.1	Hustota	12
3.2.2	Viskozita	13
3.2.3	Měrná vodivost	16
3.2.4	Povrchové napětí.....	18
3.3	Problematika sledovaných bublin.....	19
3.3.1	Tvar a velikost bublin	19
3.3.2	Koalescence a rozpad bublin	21
3.3.3	Trajektorie a vzestupná rychlost vyplouvajících bublin	22
3.3.4	Síly působící na bubliny	24
3.3.5	Drift bublin	25
4	Experimentální část	27
4.1	Experimentální zařízení	27
4.2	Průběh experimentálního měření.....	30
4.2.1	Stanovení klíčových vlastností použitých roztoků	31
4.3	Obrazový záznam a jeho vyhodnocení	35
4.3.1	Ověření správnosti programu.....	38
4.3.2	Problémy zpracování obrazu bublin programem MatLab	39
4.3.3	Analýza obrazu s vizuálně řešenými problémy	40

5	Výsledky a diskuse	41
5.1	Stanovení relativní rychlosti dvojice bublin	41
5.1	Mapy hustot pravděpodobnosti výskytu dvojice bublin	45
6	Souhrn	49
7	Závěr	50
8	Seznam symbolů a zkratk	51
9	Seznam obrázků	52
10	Seznam tabulek	54
11	Citovaná literatura	55
12	Seznam příloh	60
13	Přílohy	61

1 Úvod

Dvoufázové systémy jsou hojně využívány v celé řadě průmyslových technologií, jako jsou reaktorové procesy, membránové separace, filtrace, výměníky tepla, procesy spojené s těžbou ropy, odléváním kovů aj. Dvoufázové systémy, nejčastěji zastoupené kapalinou a plynnou částicí, jsou v probublávaných systémech využity například k homogenizaci fyzikálních a chemických vlastností taveniny kovu (oblast metalurgie) nebo ke zvýšení účinnosti přenosových jevů (chemický průmysl).

Progresivní rozvoj technologií, kladoucí důraz na účinnost, kvalitu a selektivitu daných procesů, si proto žádá hlubší poznatky o charakteru vícefázového toku. Studium dvoufázového systému plyn–kapalina je tak věnována velká pozornost jak na poli numerických simulací, tak na poli experimentálním. Předmětem zájmů studií je jak sledování chování kapaliny, tak popis samotných plynných částic – bublin. K popisu vlastností bublin bývá velmi často využita rychlost vyplouvání bublin, ze které se zjišťují parametry, jako je trajektorie vyplouvání bublin, drift bubliny, její zrychlení nebo také rychlost přibližování dvojice bublin jakožto dynamický faktor ovlivňující vzájemné interakce mezi bublinami, jako je koalescence nebo rozpad bublin. Pro porozumění dvoufázovým systémem je znalost nejenom těchto faktorů klíčová. Přestože byla provedena celá řada experimentů zaměřených na studium chování bublin, nebylo doposud realizováno mnoho prací, které by se zabývaly studiem rychlosti. Složitost uspořádání těchto experimentů pramení z nabízených možností, jak rychlost ovládat, kontrolovat, ale také sledovat. Nejjednodušší cestou, jak lze daný systém a interakce podrobně sledovat, je pořízení obrazového záznamu daného experimentu. Kvalita pořízených dat je tedy závislá na kvalitě použitého zařízení (vysokorychlostních kamer), stejně tak jako je kvalita získaných dat ovlivněna zvolenou metodou obrazové analýzy.

Metody obrazové analýzy prošly značným vývojem (od jednoduchých 2D až po složitější 3D analýzy), a umožnily tak komplexnější popis problematiky. Softwary, jež je možné využít pro obrazovou analýzu, jsou například program IMAQ™ Vision Builder od firmy National Instruments [1], Image Processing Toolbox™ jako součást programu MatLab [2], OpenCV [3] nebo softwarové vybavení firmy ADCIS [4] aj.

Z doposud navržených programů, algoritmů sloužících k získání výsledků pořízeného experimentálního obrazu (video záznamu), vyplývá, že řešení se skládá ze dvou

hlavních částí: segmentace a rekonstrukce. V první části vyhodnocení záznamu dochází k rozlišení objektů (bublin) z pořízeného záznamu a oddělní překrývajících se bublin, což se doposud jeví jako nejproblematictější část všech experimentálních měření. K tomuto je zapotřebí nespočet kroků, avšak společným rysem k získání lepších kontur je odečtení obrazu pozadí experimentu před a po zahájení experimentálního měření. V kroku následujícím je snaha rekonstruovat pomocí modifikovaných algoritmů tvar bublin vyplněním chybějících bodů, a tak získat obrysy bublin. Metody rekonstrukce jsou založeny na využití a rozpoznání konvexních a konkávních struktur vrstevnic k detekování bodů dominantních a nadbytečných. Následným vyloučením nadbytečných bodů a spojením bodů dominantních je získán rekonstruovaný obrys bubliny.

Z doposud provedených experimentů pramení, že vliv rychlosti lze kontrolovat parametry, jako je např. velikost bublin, umístění kapiláry pod povrch kapaliny v počáteční fázi vzestupu bubliny, nebo jako v této práci – rychlostí proudící kapaliny. I přes celou škálu možností uspořádání experimentu mají tyto pokusy společné rysy, jako je již zmíněné využití vysokorychlostních kamer (rozlišení až 1200x1600 pixelů), využití zrcadel a světelných zdrojů pro zlepšení viditelnosti a zachycení bubliny na kamerový záznam. Při sestavování experimentů je upřednostňováno využití nádob s obdélníkovou geometrií, od menších rozměrů (např. 15x15x500 mm³) až po rozměry větší (např. 210x210x600 mm³), méně časté je pak využití válcové geometrie nebo geometrie osmiúhelníkové. Aparatura bývá vyhotovena ze skla. Pomocí jednoduchých injekčních stříkaček, automatických pipet, až po sofistikovanější zařízení, jako jsou injekční pumpy, peristaltické pumpy, kapiláry skleněné i kovové, je do zařízení zaváděna bublina o daném objemu (v řádech mikro litrů až mililitrů) mnohdy laboratorního vzduchu, popř. také oxidu uhličitého. Ojediněle jsou využity vzácné plyny. Jako kapalina slouží k měření nejčastěji kohoutková voda, glycerín, butanol nebo soli alkalických kovů. Jak volba plynu, tak volba tekutiny podléhá především ekonomické dostupnosti.

Problematikou dvoufázových systémů a jejich základním výzkumem se dlouhodobě zabývá pracoviště školitele. Z důvodu nedostatku experimentálních dat v tomto oboru také pramení zaměření diplomové práce. K experimentálnímu měření jsou jako kapalná média využita kohoutková voda, butanol, glycerín a sada solí. K pořízení videozáznamu byla použita kamera Olympus (i-SPEED 2), s následným vyhodnocením v prostředí programu MatLab a programů MS Office.

2 Cíl práce

Cílem práce je stanovení relativní rychlosti dvojice bublin unášených v protiproudu kapaliny – vody, butanolu, glycerínu a solí. Dílčí kroky k dosažení tohoto cíle lze rozdělit následovně:

- Laboratorní příprava roztoku glycerínu a sady solí různých koncentrací: chlorid draselný, síran sodný, dodekahydrát fosforečnanu trisodného, hexahydrát dusičnanu hořečnatého.
- Provedení pokusů v laboratorní aparatuře ve všech připravených kapalinách s postupným zavedením různých objemů bublin.
- Pořízení obrazového záznamu daného experimentu na vysokorychlostní kameru.
- Obrazová analýza pořízeného záznamu a zpracování získaných dat v prostředí programu MatLab a MS Office.

3 Teoretická část

3.1 Bezrozměrná kritéria

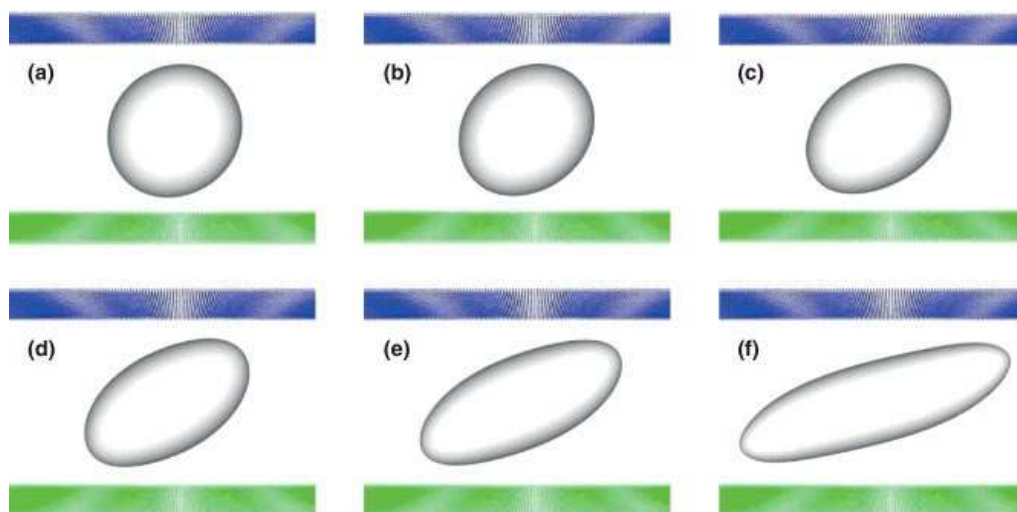
Charakteristiky chování vícefázových systémů bývají nejčastěji interpretovány pomocí bezrozměrných kritérií. Jedná se o matematické výrazy mající charakter zlomku, který dává do poměru alespoň dvě fyzikální veličiny, jejichž patřičným umocněním je získán jednotkový rozměr kritéria. Jednou z výhod zavedení bezrozměrných kritérií je redukce počtu proměnných nutných k popisu dané problematiky. Vhodnou formulací bezrozměrných kritérií je docíleno jejich jasného fyzikálního významu, čímž podávají spolehlivou informaci o významnosti porovnávaných vlivů za použití běžných fyzikálních veličin [5].

V problematice dynamiky bublin se užívají kritéria dávající do poměru síly působící na bublinu v kapalině. Jedná se o sílu setrvačnou, vazkou, sílu povrchového napětí a sílu vztlakovou. Mezi tato kritéria patří např. Reynoldsovo, Weberovo, Eötvösovo a Mortonovo a další, která lze také vyjádřit jako kombinaci kritérií výše uvedených [6].

Reynoldsovo kritérium (1) je velmi užívaným kritériem pro rozhodování o charakteru proudění. Dává do poměru síly setrvačné se silami vazkými. Také v sobě zahrnuje charakteristický rozměr d_B , kterým může být zcela volitelně jak průměr, tak poloměr trubky. Pro proudění v nekuhových průřezích se dosazuje tzv. hydraulický průměr. Dle hodnoty Reynoldsova kritéria lze proudění rozdělit do tří oblastí – oblast laminárního proudění pro nízké hodnoty Re (obvykle udávanou hodnotou je $Re < 2300$), oblast turbulentního proudění pro vysoké hodnoty Re ($Re > 4000$, někdy je také hodnota uváděna až pro $Re > 10^4$). Rozmezí $2300 < Re_{KR} < 4000$ charakterizuje oblast přechodovou a hodnota je označována jako kritická hodnota Reynoldsova kritéria. Tyto hodnoty bývají uváděny pro kruhová potrubí. V případě proudění kolem plochých desek jsou hodnoty až v řádech 10^5 [7]. Na obrázku 1 je uvedena změna tvaru vyplouvající bubliny při různých hodnotách Reynoldsova čísla. Jak je z obrázku patrné, k deformaci bubliny dochází s rostoucí hodnotou Re čísla, tedy se změnou charakteru proudění od laminárního k turbulentnímu.

$$Re = \frac{\rho_L u d_B}{\eta_L} = \frac{u d_B}{\nu_L} \quad (1)$$

Kde:	ρ_L	Hustota kapaliny	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
	u	Rychlost proudící tekutiny	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
	d_B	Charakteristický rozměr	(m)
	η_L	Dynamická viskozita	$(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
	ν_L	Kinematická viskozita	$(\text{m}^2\cdot\text{s})$



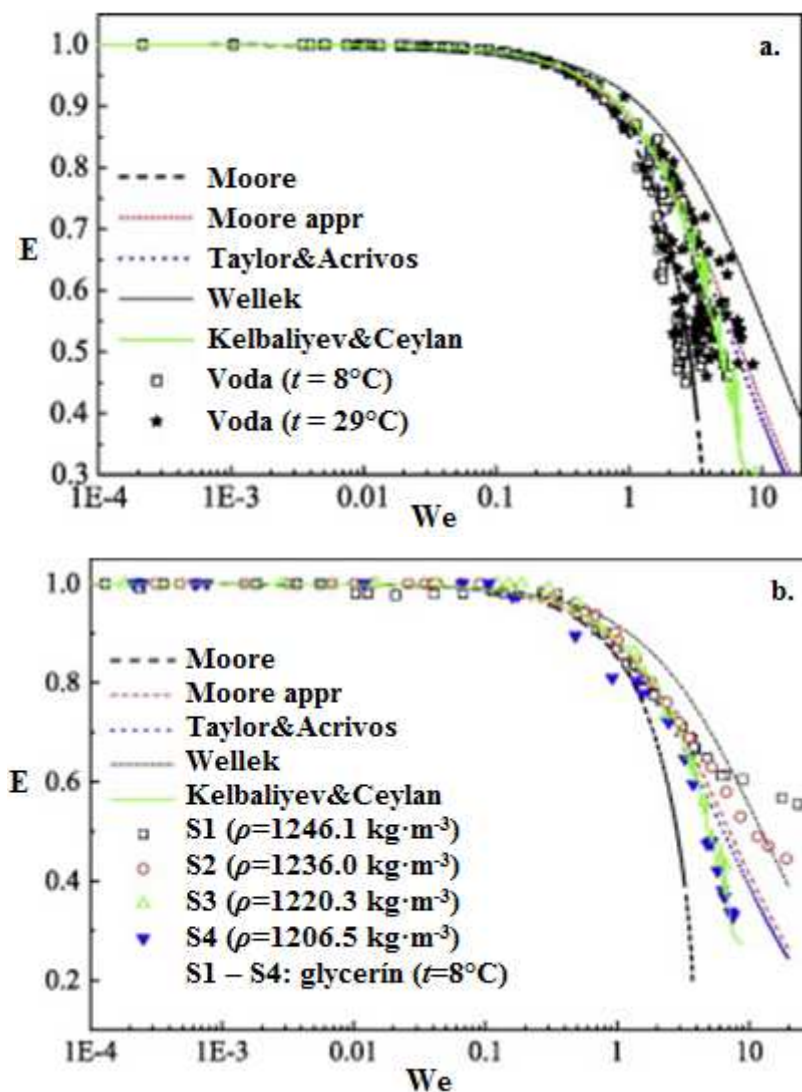
Obrázek 1. Simulace tvaru vyplouvající bubliny při různých hodnotách Reynoldsova čísla. (a) $Re = 1,875$; (b) $Re = 3,75$; (c) $Re = 7,50$; (d) $Re = 11,25$; (e) $Re = 15,0$; (f) $Re = 18,75$ [8].

Weberovo číslo (2) je užitečné v oblasti proudění tekutin tam, kde se vyskytuje rozhraní dvou tekutin, jako např. tok tenkých vrstev, dále pro analýzu vícefázových toků obsahujících silně zakřivená fázová rozhraní, obecně také u přenosu hmoty při tvorbě a rozpadu bublin, resp. kapek. Informuje nás o tom, v jakém poměru jsou v systému mezi sebou síly setrvačné se silami kapilárními, které jsou vyvolány povrchovým napětím. Vzhledem k tomu, že setrvačné a povrchové síly hrají důležitou roli při formování tvaru bublin, je Weberovo číslo relevantním parametrem pro stanovení turbulentního rozpadu částic v případě překročení jeho kritické hodnoty v důsledku nízké, resp. vysoké kinetické energie a slouží pro popis deformace bublin (obrázek 2). Byly ovšem také zjištěny okolnosti, které vedou k rozpadu bublin už i při nízkých hodnotách Weberova čísla [9].

$$We = \frac{\rho_L u^2 d_B}{\sigma} \quad (2)$$

Kde:	ρ_L	Hustota kapaliny	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
------	----------	------------------	---------------------------------

u	Rychlost proudící tekutiny	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
d_B	Charakteristický rozměr	(m)
σ	Povrchové napětí	($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)



Obrázek 2. Tvar bubliny vyjádřený excentricitou v závislosti na Weberově čísle pro vodu (a.) a pro glycerín (b.). Z experimentálních dat se ukazuje, že korelace popisující deformaci tvaru bublin v závislosti na We čísle je vhodné použít především v oblasti nízkých hodnot Weberova čísla ($We \approx 0,6$ pro vodu a $We \approx 0,2$ pro glycerín) [10].

Další bezrozměrné kritérium charakterizující deformaci tvaru bublin je **kapilární číslo** (3), které dává do poměru síly viskózní a síly povrchového napětí. Uplatňuje se v systémech s převládající viskózní silou a minimálním vlivem setrvačnosti [11].

$$Ca = \frac{\mu_L u}{\sigma} \quad (3)$$

Kde:	μ_L	Dynamická viskozita	(Pa·s)
	u	Rychlost proudící tekutiny	(m·s ⁻¹)
	σ	Povrchové napětí	(N·m ⁻¹)

Mortonovo kritérium (4) je také dáno poměrem sil viskózních a sil povrchového napětí a našlo své uplatnění ve dvoufázových systémech vzduch–voda. Užitečnou relací je zvyšování kritické hodnoty Reynoldsova čísla, a tedy snižování hodnoty Mortonova čísla. Většina experimentů vícefázových toků je zkoumána v oblasti nízkých hodnot Mo ($Mo < 10^{-6}$) v tekutinách, jako je voda a jí podobné svou viskozitou. Vysoké hodnoty Mortonova čísla jsou brány nad hodnotu 10^{-2} [12]. Bylo zjištěno, že chování bublin závisí na hodnotě Mortonova čísla kapaliny. Při nízkých hodnotách dochází k intenzivní koalescenci bublin do „rojů“ s tendencí vytvořit jednu velkou bublinu, zatímco při vysokých hodnotách není koalescence bublin pozorována. Jako hraniční hodnota mezi těmito dvěma oblastmi byla navržena hodnota $Mo \approx 4 \cdot 10^{-4}$ [13].
























































$$Mo = \frac{g\mu^4}{\rho\sigma^3} \quad (4)$$

Kde:	g	Gravitační zrychlení	(m·s ⁻²)
	μ	Dynamická viskozita	(Pa·s)
	ρ	Hustota kapaliny	(kg·m ⁻³)
	σ	Povrchové napětí	(N·m ⁻¹)

Eötvösovo kritérium (5), někdy také nazýváno Bond kritérium, je definováno poměrem sil tíhových a povrchových. Eötvösovo kritérium slouží jako ukazatel tvaru bublin (obrázek 3). S jeho rostoucí hodnotou dochází k deformaci bublin od kulového tvaru přes tvar zploštělého rotačního elipsoidu až k tvaru oscilujícímu. U velkých bublin s velkou hodnotou Eötvosova kritéria dochází k rozpadu na menší bubliny [6], [14]. Eötvösovo číslo je v podstatě mírou objemu bubliny. Popisuje tedy, jak se parametr mění s tímto objemem [12].

$$Eo = \frac{(\rho_L - \rho_G)gd_B^2}{\sigma} \quad (5)$$

Kde:	ρ_L	Hustota kapaliny	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
	ρ_G	Hustota plynu	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
	g	Gravitační zrychlení	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
	d_B	Charakteristický rozměr	(m)
	σ	Povrchové napětí	$(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$

Parametr		Bo							
		0.5	1	5	10	20	50	100	200
Re	1								
	5								
	10								
	20								
	50								
	100								
	200								

Obrázek 3. Simulace tvaru bubliny jako funkce Reynoldsova a Bondova čísla [15].

Froudeho kritérium (6) dává do poměru síly setrvačné a tíhové. Uplatňuje se při zkoumání pohybu v prostředích s vyšší hustotou, kde jsou probíhající jevy ovlivněny gravitační silou. Spolu s Reynoldsovým kritériem se užívá k popisu proudícího prostředí a výpočtům přenosu hybnosti v otevřených kanálech [5].

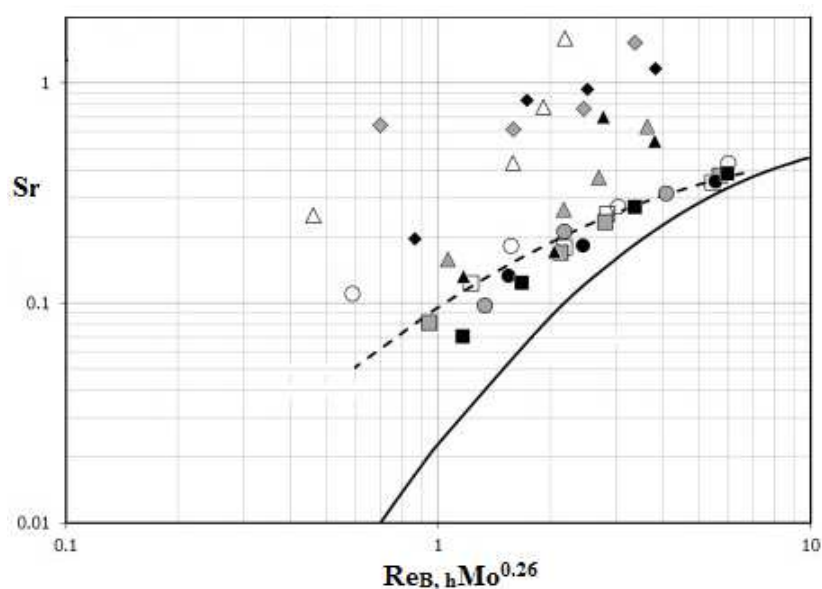
$$Fr = \frac{u}{\sqrt{\frac{\Delta\rho g d_B}{\rho_L}}} \quad (6)$$

Kde:	u	Rychlost proudící tekutiny	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
	$\Delta\rho$	Rozdíl hustot prostředí	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
	g	Gravitační zrychlení	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
	d_B	Charakteristický rozměr	(m)
	ρ_L	Hustota kapaliny	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$

Strouhalovo kritérium [obrázek 4, (7)] je založeno na zkoumání akustických jevů provázejících pravidelné odtrhávání vírů na válcích a jiných špatně obtékaných těles. Pozdější definice přichází s popisem vzniku periodického proudění při ustáleném pohybu tuhého tělesa vzduchem a dává do souvislosti frekvenci, charakteristický rozměr a měřítka rychlosti periodicky se měnícího proudění. Vznik vírů za tělesem vede k odtrhávání proudů, které způsobují změnu rozložení tlaku, resp. změnu silových účinků na těleso a dochází ke generování zvuku [16].

$$St = \frac{f d_B}{u} \quad (7)$$

Kde:	f	Frekvence uvolňování vírů kolem tělesa	(s^{-1})
	d_B	Charakteristický rozměr	(m)
	u	Rychlost proudící tekutiny	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$



Obrázek 4. Grafická závislost Strouhalova kritéria znázorňující jeho rostoucí charakter s rostoucím součinem Reynoldsova a Mortonova kritéria pro vodu (prázdné značky) a xanthan (plné značky) při různých objemech bubliny [17].

Všechna výše uvedená kritéria (1–7) lze také vyjádřit jejich vzájemnou kombinací, popřípadě jejich kombinací vznikají kritéria nová, jako je Tadakiho číslo (11) nebo odporový koeficient pro kouli (12). **Tadakiho číslo** (11) je dáno součinem Reynoldsova a Mortonova čísla. Mortonovo číslo je zde umocněno konstantou 0,23, která zohledňuje slabou závislost na viskozitě. V případě vyššího exponentu by byl vliv viskozity zcela potlačen [18]. Toto bezrozměrné kritérium našlo své uplatnění při popisu tvaru bublin, k jehož deformaci dochází velmi snadno, a hraje tak důležitou roli při popisu ustálené rychlosti bublin [19].

$$Re = We^{0,5} \left(\frac{Eo}{Mo} \right)^{0,25} \quad (8)$$

$$Fr = \frac{We}{Eo} \quad (9)$$

$$We = \frac{4 Eo}{3 C_D} \quad (10)$$

$$Ta = Re Mo^{0,23} \quad (11)$$

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{1}{Fr} = \frac{4}{3} \frac{Mo Re^4}{We^3} \quad (12)$$

3.1.1 *Odporový koeficient*

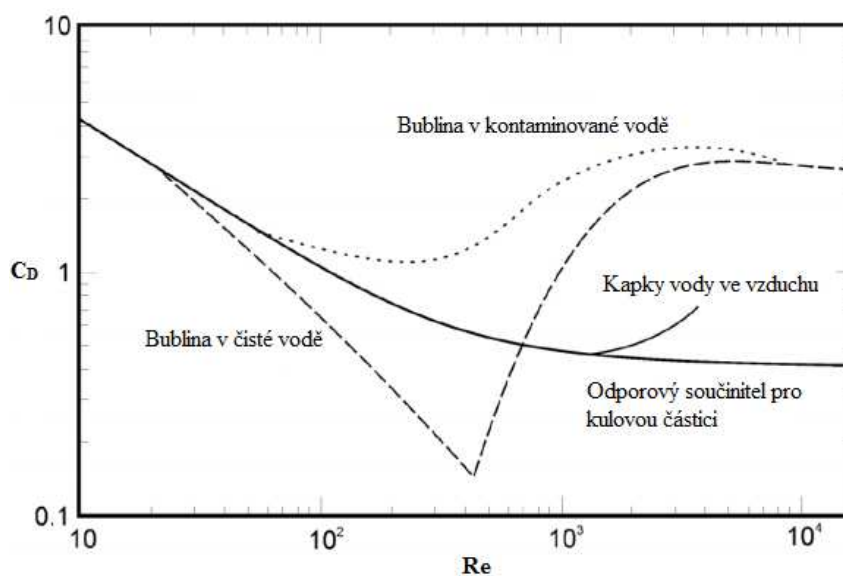
Odporová síla (drag force) je zodpovědná za brždění pohybu bubliny nebo kapky v pohybující se vazké tekutině a je složena ze dvou jevů. První, odpor tvarový, je úzce spjat s velikostí a tvarem bubliny a odpovídá mu nerovnoměrná distribuce tlaku kolem pohybující se bubliny. Druhá složka odporu (odpor viskózní) je způsobena viskozitou dané tekutiny. Další faktory mající vliv na odporovou sílu jsou např. prostorová orientace bubliny vzhledem k danému toku tekutiny, čistota systému, mobilita fázového povrchu bubliny aj. [6]. Tedy, čím větší čelní plocha bubliny je orientována ve směru proudění, tím větší je odporová síla. Čím větší je odporová síla, tím větší je tlak na tuto plochu a tím větší je deformace tvaru bubliny. Velikost obou příspěvků, odporů, je úzce spjata s Reynoldsovým číslem a bezrozměrné kritérium popisující tuto závislost je označováno jako **odporový koeficient** (12). Závislost odporového koeficientu na Reynoldsově čísle je obvykle znázorňována graficky (obrázek 5).

Tato závislost byla popsána mnoha výrazy, jejichž počet je v řádech desítek (cca 35, [19]). Přehled některých závislostí uvádí tabulka 1, více závislostí je pak přehledně uspořádáno v práci [6].

Tabulka 1. Vybrané korelace odporového koeficientu, $C_d(Re)$ [19].

Stokes, 1951	$24/Re$	$Re \rightarrow 0$	(13)
Oseen, 1927	$(24/Re) \cdot [1 + Re/16]$	$Re \ll 0$	(14)
Schiller & Naumann, 1933	$(24/Re) \cdot [1 + 0,15Re^{0,687}]$	$2 \leq Re \leq 800$	(15)
Nguyen, Schulze 2004	$(24/Re) \cdot [1 + 0,169Re^{2/3}]$	$0 \leq Re \leq 700$	(16)
Nguyen, Schulze 2004	$(24/Re) \cdot [1 + 0,216Re^{1/2} + 0,0118Re]$	$0 \leq Re \leq 1000$	(17)

Pro velmi nízké hodnoty Re (blížíci se nule) byla tato závislost analyticky popsána Stokesovým zákonem (13) obtékání tuhé koule. U velmi vysokých hodnot Re a při překročení kritické hodnoty, je zvětšován příspěvek tvarového odporu a celková odporová síla je téměř výhradně způsobena ději souvisejícími se separací toku kapaliny za bublinou. Hodnota odporového koeficientu tak s rostoucí hodnotou Re výrazně klesá a např. u středně velkých bublin v kapalině nízké viskozity (např. bubliny vzduchu v organických rozpouštědlech nebo ve vodě) na hodnotě Reynoldsova čísla téměř nezávisí a pohybuje se zpravidla v rozmezí $<0,5 - 1>$ [19], [20].



Obrázek 5. Závislost odporového koeficientu na Reynoldsově čísle [21].

3.2 Fyzikálně chemické vlastnosti tekutiny a experimentální metody jejich stanovení

Znalost následujících fyzikálně chemických vlastností tekutiny vyplývá právě z jejich potřeby pro výpočet bezrozměrných kritérií, která, jak již bylo zmíněno, jsou využívána k popisu chování bublin v tekutině. Tyto vlastnosti bublin (koalescence, rozpad, aj.) jsou rozepsány v následující kapitole 3.3.

3.2.1 Hustota

Hustota (18), také označována jako měrná hmotnost, udává hmotnost látky připadající na jednotku jejího objemu a její základní jednotkou je $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Její převrácená hodnota je označována jako měrný objem.

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (18)$$

Kde: dm Hmotnost objemového elementu dV

Tento vztah (18) platí pro heterogenní tělesa, kdy se hodnota hustoty může lišit jak s místem, tak s časem, a je tedy funkcí jak prostorové, tak časové souřadnice (19), které je při jejím stanovení potřeba sledovat.

$$\rho = f(x, y, z, \tau) \quad (19)$$

V případě homogenních těles hustota přechází na následující tvar (20)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (20)$$

Kde: m Hmotnost tekutiny (tělesa) (kg)
 V Objem tekutiny (tělesa) (m^{-3})

Hustota čistých pevných látek a kapalin je v podstatě nezávislá na tlaku (vzhledem k malé stlačitelnosti) a uvažuje se pouze v závislost na teplotě.

Volba metody pro stanovení hustoty se odvíjí od požadavků na rychlost a přesnost jejího stanovení.

Pyknometrická metoda – jedna z nejpresnějších metod založená na skutečnosti, že poměr hmotností stejného objemu zkoumané a srovnávací kapaliny (nejčastěji voda) odpovídá poměru jejich hustot. Měření je prováděno pomocí pyknometru, jeho vážením s danou kapalinou, při konstantní teplotě.

Mohrovy (Mohr-Westfalovy) vážky – tato metoda vychází z Archimedova zákona. Jedná se o nerovnoramenné váhy, na jejichž jeden konec se zavěsí ponorné tělísko, jež je ponořeno do zkoumané tekutiny, a na konci druhém dochází pomocí kalibrovaných tělísek k vyvážení do rovnovážné (nulové) polohy. Hodnota hustoty se určí z polohy a hmotnosti tělísek umístěných na rameno vah. Tato metoda je již automatizována – např. zařízení společnosti KRÜSS.

Hustoměry – opět se uplatňuje Archimedův zákon. Ponořený hustoměr do kapaliny je nadnášen vztlakovou silou rovnou hmotnosti objemu vytlačené kapaliny. Hustota je odečtena ze stupnice na hustoměru v závislosti na jeho ponoření do kapaliny. Ponorné hustoměry slouží orientačnímu měření, zatímco vibrační hustoměry poskytují přesnější výsledky [22].

3.2.2 Viskozita

V případě ideálních tekutin, a v případě nepohybujících se reálných tekutin, nepředpokládáme existenci smykového (tečného) napětí. Jestliže uvažujeme reálnou pohybující se tekutinu, vzniká v ní právě v důsledku smykové rychlosti smykové napětí. K těmto jevům dochází na rozhraní dvou sousedních vrstev tekutiny, kdy se každá z vrstev pohybuje různou rychlostí. Příčinou tohoto jevu je viskozita, která určuje, jak se tekutina brání tečení – deformaci v toku.

Závislost tečného napětí na rychlosti smykové deformace, kde viskozita (dynamická) vystupuje jako konstanta úměrnosti, popsal Newton (21). Rychlost smykové deformace neboli gradient rychlosti, je určovaný ve směru kolmém ke směru proudění.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (21)$$

Kde:	τ	Smykové napětí	(Pa)
	$\frac{du}{dy}$	Gradient rychlosti	(m·s ⁻²)
	η	Dynamická viskozita	(Pa·s)

Tímto zákonem se řídí tzv. newtonské tekutiny (plyny, páry, běžné kapaliny). Pro newtonské tekutiny (polymerní taveniny, koncentrované roztoky polymerů, suspenze, apod.), jejichž závislost tečného napětí na rychlosti smykové deformace je mnohem složitější a viskozita závisí především na rychlostním gradientu místo na smykovém napětí, tento zákon v této podobě neplatí.

Viskozita tekutiny je závislá na teplotě a méně na tlaku. Vliv tlaku se projeví až při jeho vysokých hodnotách a s rostoucím tlakem roste i viskozita. Naopak s rostoucí teplotou viskozita klesá. Tato závislost je popsána Andradovou rovnicí (22).

$$\mu = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right) \quad (22)$$

Kde:	μ	Dynamická viskozita	(Pa·s)
	A, B	Empirické konstanty	(-)
	T	Termodynamická teplota	(K)

Protože by se konstanty v této formě musely určit numericky, je tento vztah linearizován do upraveného tvaru [rovnice (23)], kde konstanta B je směrnici regresní přímky a konstanta C je posunutí na ose y.

$$\log \mu = C + \frac{B}{T} \quad (23)$$

Kde:	$C = \log A$
	$B = 2,303 \frac{E}{R}$

V bezrozměrných kritériích často vystupuje kinematická viskozita (24), která je dána podílem dynamické viskozity a hustoty kapaliny.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (24)$$

Kde:	ν	Kinematická viskozita	(m ² ·s ⁻¹)
	μ	Dynamická viskozita	(Pa·s)
	ρ	Hustota tekutiny	(kg·m ⁻³)

Metody pro stanovení hodnot viskozity lze rozdělit do tří základních skupin: kapilární viskozimetry, rotační viskozimetry a tělískové viskozimetry.

Kapilární viskozimetry – jsou založeny na platnosti Hagen–Poiseuilleova zákona při laminárním proudění v kruhovém potrubí (kapiláře). Při laminárním toku tekutiny kapilárou o známých geometrických rozměrech (vnitřní průměr, resp. poloměr, délka), je dynamická viskozita úměrná objemovému průtoku a tlakovému spádu mezi začátkem a koncem kapiláry. Viskozitu lze pak jednoduše spočítat z rovnice (25). Při měření se nejčastěji sleduje objemový průtok kapaliny při konstantním tlakovém spádu (viskozimetr

Ostwaldův, viskozimetr Ubbelohde, viskozimetr Vogel-Ossag). Složitějším uspořádáním je měření viskozity s konstantním objemovým průtokem. K této metodě můžeme přiřadit i výtokové viskozimetry, např. viskozimetr Eulerův, Redwoodův, Sayboltův).

$$\mu = \frac{\pi}{128} \frac{p_z d^4}{QL} \quad (25)$$

Kde:	p_z	Tlakový spád	(Pa)
	d	Vnitřní průměr kapiláry	(m)
	L	Délka kapiláry	(m)
	Q	Objemový průtok tekutiny	(m ³ ·s ⁻¹)

Rotační viskozimetry – jsou nejčastěji ve třech variantách uspořádání (dva sousedící válce, kužel – deska, dvě rotující desky) založeny na principu měření odporu, kterým působí rotující kapalina na těleso zavěšené na torzním vlákně. Měření viskozity je přeneseno na měření momentu síly při konstantních otáčkách, nebo naopak na měření otáček při konstantním momentu síly. V případě sousedících válců může nastat dvojí uspořádání – otáčí se válec vnitřní (systém Couett), nebo válec vnější (systém Searle). Pro měření viskozity nezáleží na systému, neboť pro výpočet stačí uvažovat jen jejich vzájemnou rychlost. Pro měření je důležité se pohybovat v oblasti laminárního proudění, přičemž je nutné se vyvarovat vzniku Taylorových vírů, které mohou ovlivnit přesnost měření, stejně jako rostoucí teplota způsobená vyššími otáčkami. Uspořádání kužel–deska je vhodným uspořádáním pro měření viskozity newtonských tekutin.

Tělískové viskozimetry – měření viskozity je založeno na měření rychlosti pádu tělíska (nejčastěji kuličky, popř. válečku) v dané tekutině a platnosti Stokesova zákona (26) pro pád koule ve viskózním prostředí. Platí, že při pomalém (laminárním) proudění je odpor, který klade tekutina pohybu tělesa, úměrný rychlosti pádu tělíska. Nejznámějším z mnoha možných konstrukčních uspořádání je Höpplerův viskozimetr, ve kterém kulička padá nakloněnou trubicí [23].

$$\mu = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho_K - \rho_T)}{u} \quad (26)$$

Kde:	r	Poloměr kuličky	(m)
	g	Tíhové zrychlení	(m·s ⁻²)

ρ_K	Hustota kuličky	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_T	Hustota prostředí	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
u	Rychlost pádu kuličky	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

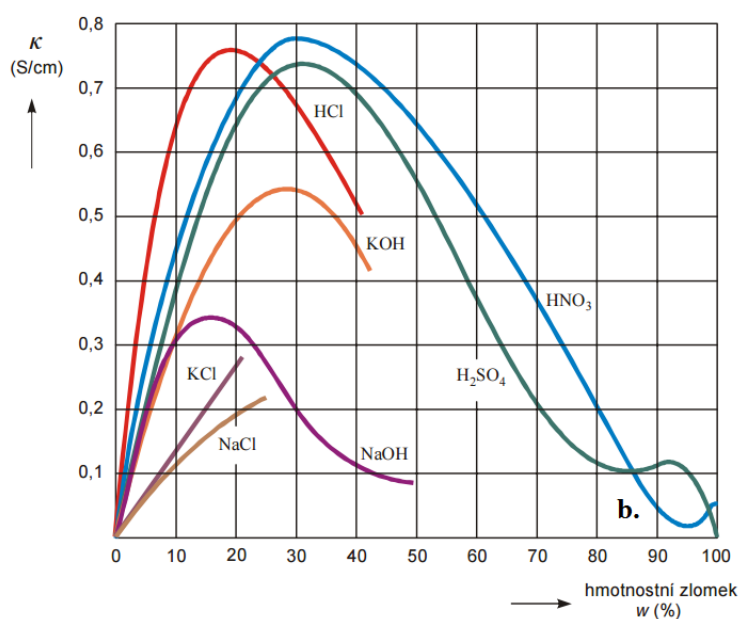
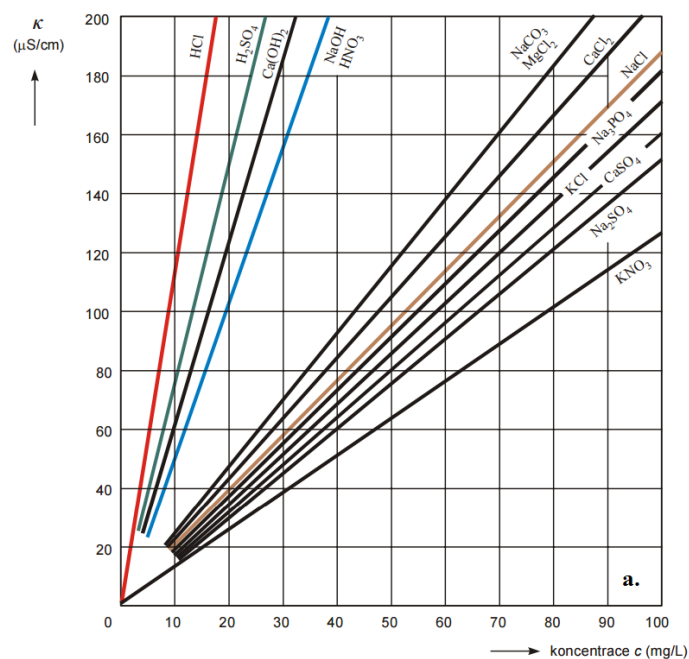
3.2.3 Měrná vodivost

Měrná vodivost (konduktivita) udává přibližnou míru koncentrace elektrolytů v roztoku, je charakteristická pro každou látku a je vyjádřena jako převrácená hodnota měrného odporu (27). Hodnota konduktivity nepopisuje roztok ve smyslu konkrétního složení jednotlivých iontů a jejich množství, ale udává celkovou charakteristiku systému. Zprostředkovaně se jedná o informaci o celkovém obsahu solí, disociovaných kyselin a zásad [24].

$$\kappa = \frac{1}{\rho}; \text{ resp. } \kappa = \frac{1}{R} \frac{l}{S} \quad (27)$$

Kde:	κ	Měrná vodivost roztoku	($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
	ρ	Měrný odpor	($\Omega^{-1}\cdot\text{m}$)
	R	Elektrický odpor	(Ω)
	l	Délka vodiče	(m)
	S	Průřez vodiče	(m^2)

Konduktivita je závislá na vlastnostech roztoku, jako jsou aktivita a koncentrace rozpuštěných složek, disociační stupeň a také teplota, které mimo jiné ovlivňují pohyblivost iontů v roztoku (roste s rostoucí teplotou). Vzrůst teploty o 1 °C vede k nárůstu konduktivity o 1,5 % až 7 %. Závislost měrné vodivosti na koncentraci roztoku pro některé elektrolyty ukazuje obrázek 6. V oblasti malých koncentrací je závislost konduktivity na koncentraci téměř lineární (obrázek 6/a). Pro roztoky o vyšších hodnotách hmotnostního zlomku dosahuje konduktivita své maximální hodnoty při určitém složení a s dalším nárůstem hmotnostního zlomku již klesá (obrázek 6/b) [25].



Obrázek 6. Závislost konduktivity na koncentraci, resp. hmotnostním zlomku pro zředěné (a) a koncentované (b) roztoky [25].

Konduktivitu lze měřit dvěma způsoby:

Kontaktní metody – elektrody vodivostní sondy jsou v přímém kontaktu s měřeným elektrolytem, jsou jím smáčeny. Elektrody i sondy bývají vyrobeny z odolných látek (např. grafit, platina, nerez pro elektrody a polyvinylchlorid, epoxidové pryskyřice nebo sklo pro tělo sondy), aby nedošlo k jejich poškození agresivními kyselinami. Mezi tato zařízení patří dvouelektrodová nebo čtyřelektrodová sonda.

Bezkontaktní metody – tyto metody jsou upřednostňovány vzhledem k jejich menší náročnosti na údržbu (aktivní část snímače nepřichází do kontaktu s měřenou kapalinou) a také vyšší přesnosti měření. Nevýhodou je jejich finanční náročnost. Dělí se na indukční a kapacitní. Indukční snímač (dva transformátory spojené závitem z izolační trubky) je sestaven jako trubice z nevodivého materiálu, do které je zavedena měřicí kapalina. Kapacitní snímače mají na vnější straně nekovové trubice umístěné dvě kovové elektrody [26], [27].

3.2.4 Povrchové napětí

Povrchové napětí vzniká v důsledku vzájemných interakcí přitažlivých sil atomů nebo molekul povrchové vrstvy kapaliny. Působení sil uvnitř molekuly kapaliny je ve všech směrech stejné (v rovnováze), zatímco na rozhraní s jinou látkou je rovnováha narušena. Vzhledem k malému dosahu působících okolních sil na molekulu kapaliny je projev nerovnováhy pouze v nepatrné vrstvě kapaliny na hladině. Povrch kapaliny se pak chová, jako by byl potažen tenkou pružnou vrstvou, která se při daném objemu kapaliny snaží zaujmout co nejmenší plochu. Povrchové napětí je definováno jako síla působící na jednotku délky rozhraní, a to kolmo k této délce, a v rovině povrchu (28).

$$\sigma = \frac{dE}{dS}; \text{ resp. } \sigma = \frac{dF}{dl} \quad (28)$$

Kde:	dE	Povrchová energie	(J)
	dS	Plocha rozhraní	(m ²)
	dF	Element síly působící na povrch kapaliny	(N)
	dl	Délkový element povrchu kapaliny	(m)

Povrchové napětí závisí na druhu látek, které spolu tvoří rozhraní (kapalina–kapalina, kapalina – pevná látka, kapalina–plyn), a velmi také na teplotě (s rostoucí teplotou obvykle klesá) [28].

Metody pro stanovení povrchového napětí dělíme do tří základních skupin:

Statické metody – založené na sledování ustáleného rovnovážného stavu, což umožňuje získat skutečné rovnovážné hodnoty povrchového napětí. To je důležité především pro studie roztoků. Na rovnovážných rozhraních je různá koncentrace oproti koncentraci v objemové fázi, případně může také docházet k orientaci molekul. Oba děje potřebují určitou dobu, aby mohlo dojít k ustavení rovnováhy, ale u rychle obnovujících se

povrchů není většinou dostatek času. Hodnoty povrchového napětí jsou na čase nezávislé v případě dosažení rovnováhy. Mezi statické metody patří metoda kapilární elevace, metoda měření vzestupu kapaliny na svislé desce, metoda vyvažování Wilhelmyho destičky, analýza profilu kapek a bubliny a metoda rotující kapky.

Semistatické metody – založeny stejně jako statické metody na dosažení rovnovážného stavu soustavy, ale v tomto případě se jedná o rovnováhu nestabilní. U zkoumání každé soustavy je důležitá volba optimální rychlosti, která je potřebná k přiblížení se rovnovážnému stavu, aby měření nebyla příliš dlouhá a současně bylo dosaženo požadovaných výsledků. Ty se pouze blíží skutečným rovnovážným hodnotám. Těmito metodami jsou: metoda maximálního přetlaku v bublině, metody odtrhávací a metody stalagmometrické.

Dynamické metody – tyto metody (metoda oscilujícího proudu, měření rozptylu světla, sledování kapilárního vlnění na fázovém rozhraní, oscilující kapka) jsou využívány ke studiu výrazně nerovnovážných stavů povrchových vrstev kapalin a rychlosti ustavování rovnovážné struktury jejich povrchu [29].

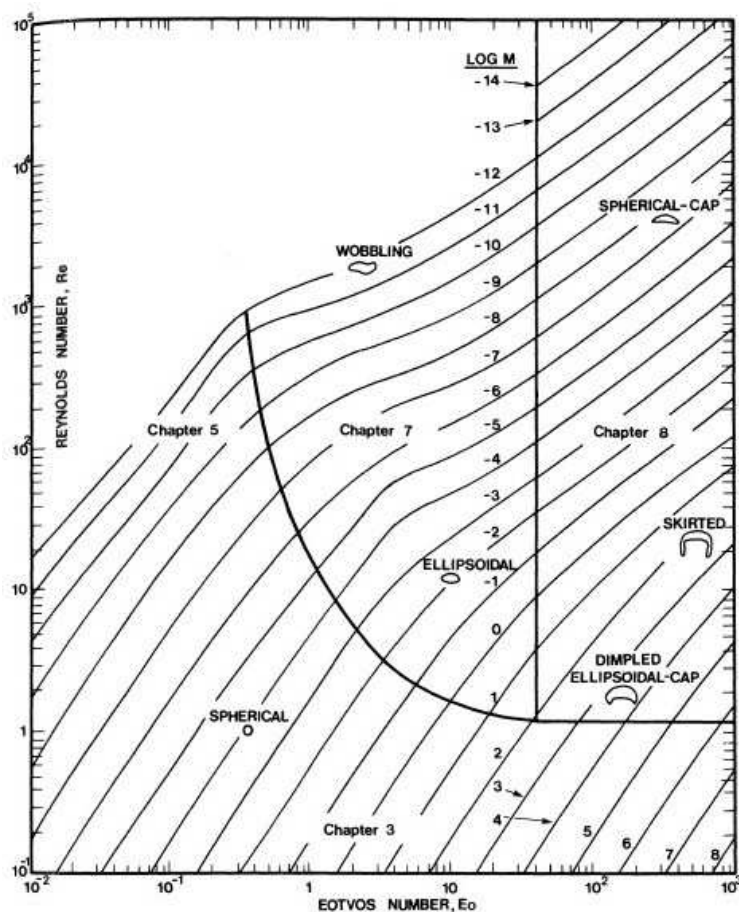
3.3 Problematika sledovaných bublin

Porozumění vlastnostem bublin a jejich chování (jako je jejich tvar, velikost, koalescence, rozpad nebo dráha jejich pohybu) má zásadní význam pro pochopení a popis dynamiky proudění tekutiny a přenos tepla/hmoty. Správný návrh a provoz zařízení využívajícího dvoufázový tok se opírá o správnou predikci těchto parametrů.

3.3.1 Tvar a velikost bublin

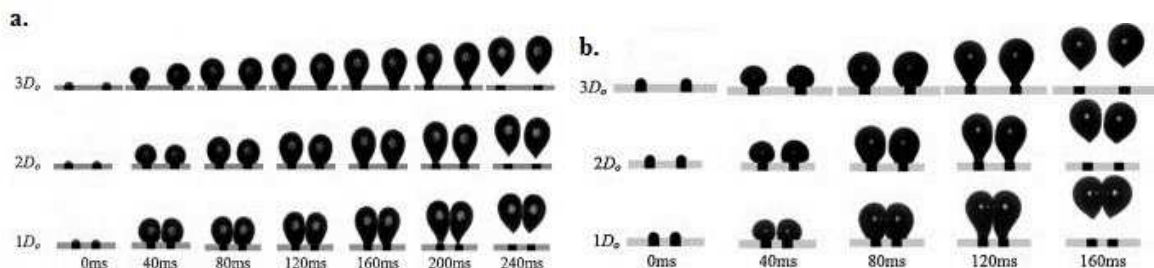
Tvar bublin je popisován bezrozměrovými kritérii – Reynoldsovým, Eötvösovým a Mortonovým; kritérii, které dávají do poměru síly mající vliv na tvar bubliny, tedy převážně síly tíhové a povrchové. To platí především pro nízko vazké tekutiny. Byla navržena korelace těchto kritérií ($10^{-2} < Eo < 10^3$, $10^{-14} < M < 10^8$, $10^{-1} < Re < 10^5$), pro různé tvary bublin. K popisu tvaru bublin je velmi často využíván Cliftův bezrozměrný diagram, viz obrázek 7. Vliv na tvar bublin mají jak vlastnosti plynu, kterým je bublina tvořena, tak vlastnosti tekutiny, ve které se bublina vyskytuje (teplota, hustota, viskozita, povrchové napětí, elektrická vodivost). Obecně platí, že s rostoucí velikostí bublin (jejich průměrem) a také s rostoucími hodnotami bezrozměrných kritérií dochází k deformaci tvaru bubliny od kulového přes elipsoidní tvar až ke tvaru oscilačnímu. Tvar elipsoidních bublin je

charakterizován parametrem nazývaným excentricita, představujícím poměr vedlejší a hlavní poloosy rotačního elipsoidu. Síly působící na bublinu jsou často také vyjadřovány pomocí odporového koeficientu pro bublinu elipsoidního tvaru využitím Reynoldsova kritéria (resp. Eötvösova kritéria) a excentricity. Excentricita hraje také důležitou roli pro přenos tepla a hmoty, kdy např. koeficient přenosu hmoty pro bublinu elipsoidního tvaru je vyjadřován pomocí excentricity, Reynoldsova a Schmidtova kritéria [30], [31].

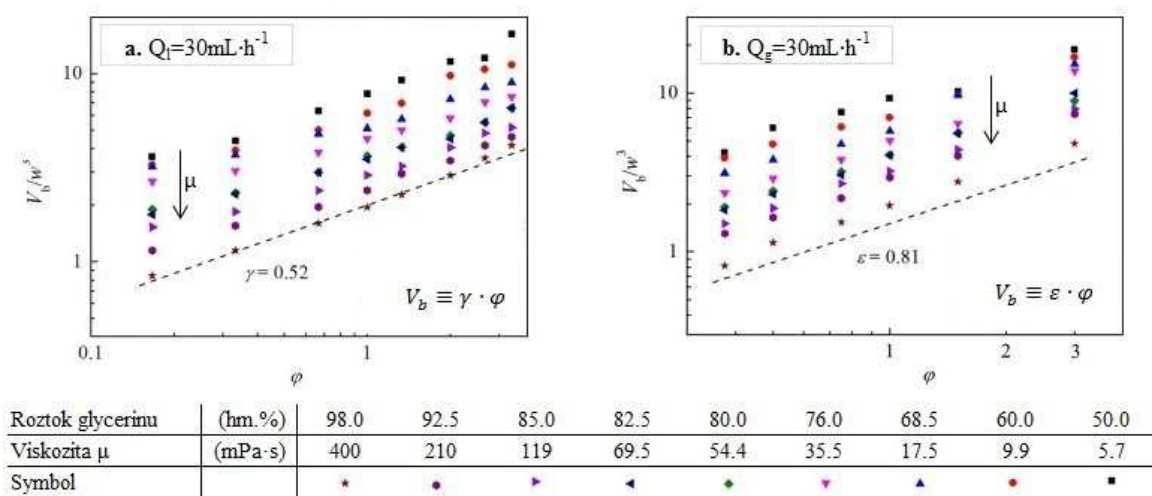


Obrázek 7. Obvyklé tvary bublin v proudící tekutině [21].

Studiu **velikosti (objemu) bublin** byla také věnována značná pozornost. Objem bublin se mění již od jejich počátečního výskytu v kapalině až po vyplutí bublin z kapaliny a podléhá mnoha parametrům. Mezi tyto parametry patří např. *parametry otvorů*, z nichž jsou bubliny tvořeny: průměr, objem a vzdálenost otvorů, jejich materiál a konstrukce (podrobněji rozebráno např. v pracích [32], [33] a [34]; př. obrázek 8), nebo *vlastnosti tekutiny*, ve které se bubliny vyskytují: koncentrace, hustota, povrchové napětí, viskozita, povaha tekutiny (polární, nepochární, newtonská, nenewtonská, statická, proudící), rychlost proudění (velmi podrobně popsáno v práci [35]; př. obrázek 9).



Obrázek 8. Tvar bublin v karboxymethylcelulóze (1,5 %; a.) a v glycerínu (97,0 %; b.) v různém čase pro různé průměry otvorů ($D_0=2,4$ mm). Lze pozorovat, že větší deformaci tvaru podléhají bubliny plynu v karboxymethylcelulóze (tvar více protažený oproti tvaru slzy u glycerínu), a to v důsledku snížené viskozity po průchodu bubliny newtonskou tekutinou. Deformace bublin klesá s rostoucí vzdáleností otvorů [33].



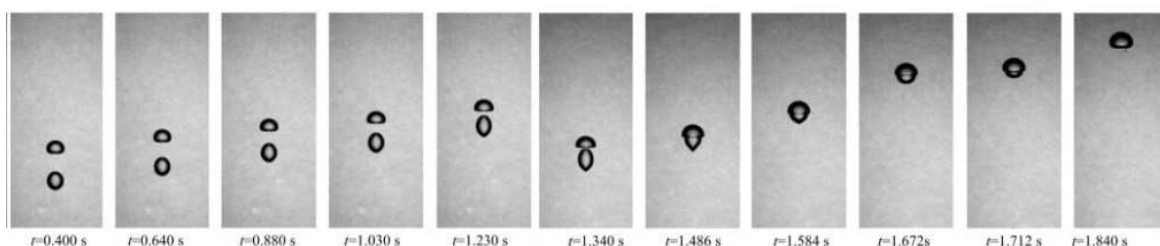
Obrázek 9. Bezrozměrný objem bublin ($V_b/w^3 = 1,12\phi^{0,52}Ca^{-0,29}$) jako funkce poměru průtoku kapalně a plynné fáze ($\phi = Q_g/Q_l$) pro různé viskozity glycerínu. S rostoucím průtokem plynné fáze se objem bubliny zvětšuje, zatímco s rostoucím průtokem kapalně fáze a s její rostoucí viskozitou se objem bubliny zmenšuje. Na obrázku je také patrná změna objemu bubliny o řád, což naznačuje, že s objemem bubliny můžeme manipulovat pomocí průtoku plynu, který je téměř nezávislý na viskozitě kapaliny, nebo pomocí průtoku kapaliny, který je relevantní dané hustotě (V_b – objem bubliny v μL , w – šířka kanálu v μm) [36].

3.3.2 Koalescence a rozpad bublin

Koalescence a rozpad (break-up) bublin jsou další jevy, na něž je zaměřena celá řada studií, a mají zásadní význam jak pro přenos hmoty/tepla, tak na chemickou reakci uvnitř zařízení; obojí mohou při svém průběhu nežádoucím způsobem ovlivnit. Faktory mající vliv na tyto jevy jsou – vlastnosti kapaliny, povrchově aktivní látky, způsob rozdělení plynu, velikost bublin aj. Oba jevy jsou také významně ovlivněny rychlostí proudící kapaliny.

Dosavadní studie ukazují, že koalescenci, resp. rozpadu, více podléhají větší bubliny v kapalinách proudících nižší rychlostí a s nižším povrchovým napětím [8], [20].

Proces **koalescence** (obrázek 10) lze rozdělit do tří kroků: kolize dvou bublin se zachycením malého množství tekutiny mezi nimi, odtékání kapalného filmu z prostoru mezi bublinami až do dosažení jeho kritické tloušťky a následné prasknutí kapalného filmu vedoucího ke koalescenci dvou bublin.



Obrázek 10. Etapy koalescence [37].

S první teorií o rozpadu bublin v turbulentním proudění přišel roku 1949 ve své práci [38] A. N. Kolmogorov. **Rozpad bublin** (obrázek 11) je často spojován se studiem interakce bublin s víry. Pouze víry odpovídající Kolmogorově délkové stupnici velikosti bubliny mohou vyvolat rozpad bubliny (dojde k překonání povrchových sil), ke kterému malé víry postrádají dostatečnou energii [39].

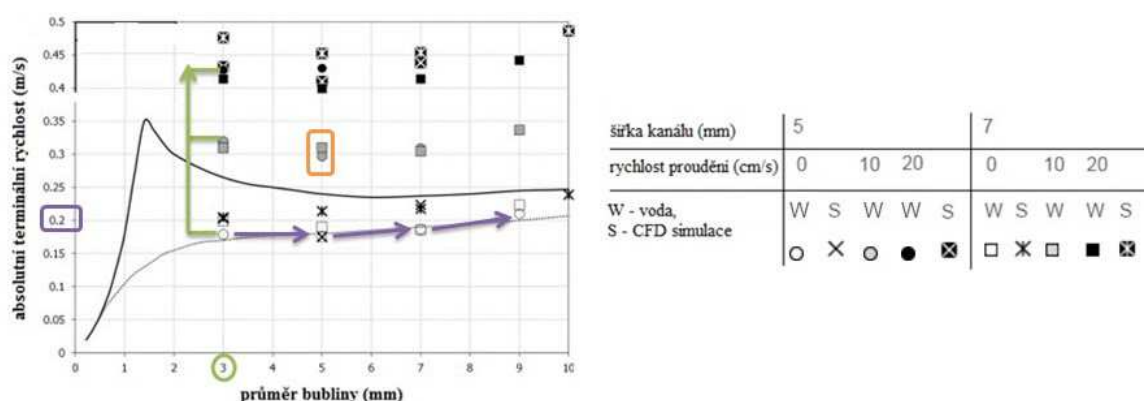


Obrázek 11. Průběh rozpadu bubliny [37].

3.3.3 Trajektorie a vzestupná rychlost vyplouvajících bublin

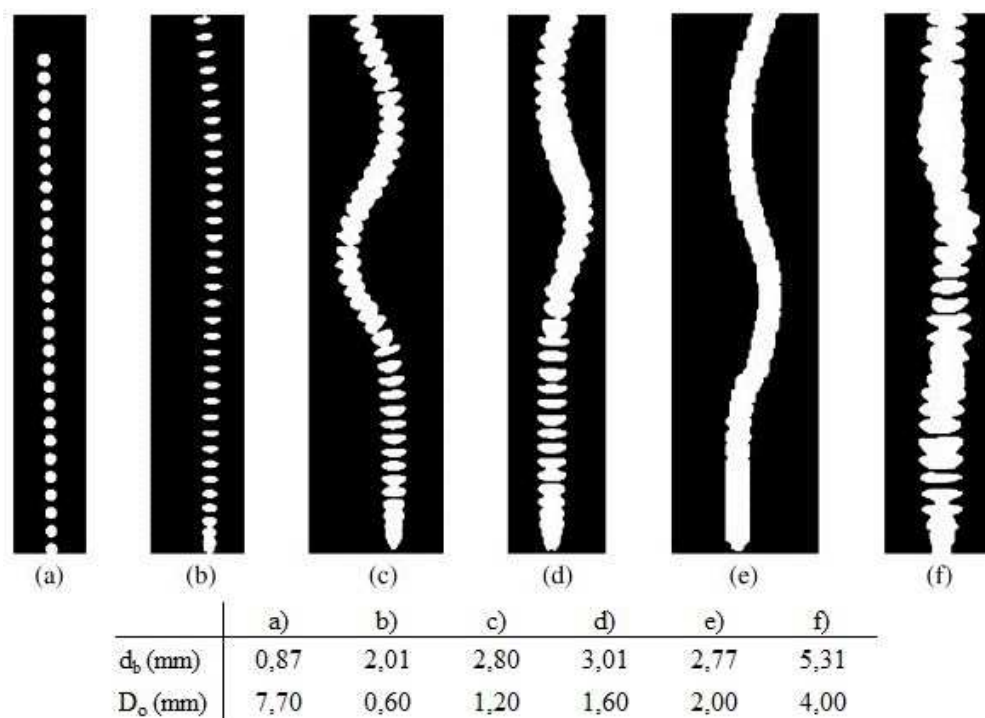
Trajektorie a vzestupná rychlost vyplouvajících bublin patří spolu s odporovým koeficientem k jednomu z nejvýznamnějších dynamických faktorů určujících chování bublin vzduchu. Velmi rychle po své formaci bublina dosahuje **terminální rychlosti**, která u plynné bubliny odpovídá rychlosti dosažené v ustáleném stavu. Tedy ve stavu, kdy jsou všechny síly působící na bublinu v rovnováze. Tato rychlost závisí na objemu bubliny, jejích fyzikálních vlastnostech a také na fyzikálních vlastnostech tekutiny. Při vyplouvání bubliny

v newtonských tekutinách hrají roli také reologické vlastnosti. V případě nízkých hodnot Reynoldsova kritéria roste rychlost vyplouvání spolu s rostoucím poloměrem bubliny (viskózní síly převažují nad silami setrvačnými), pro střední hodnoty Reynoldsova kritéria ($Re > 1$) může rychlost vyplouvání stoupat, zůstat konstantní, nebo klesat v závislosti na ekvivalentním průměru bubliny (v této oblasti je rychlost určena jak povrchovým napětím, tak setrvačnými silami). Při vysokých hodnotách Re kritéria dominují síly setrvačné a rychlost vyplouvání roste s ekvivalentním průměrem bubliny (obrázek 12) [17], [40].



Obrázek 12. Závislost absolutní rychlosti vyplouvání bubliny na průměru bubliny (1) pro různou šířku kanálu (2) a rychlost proudění tekutiny (3). Při změně průměru bubliny, avšak při zachování dalších dvou parametrů (2 a 3), nebyla pozorována větší změna ve velikosti rychlosti vyplouvání (fialová). Z porovnání rychlostí pro stejně velké bubliny (1 a 3 neměnné) pohybující se v různě širokém kanálu se výsledky neliší o více než 5 % (oranžová). Zvyšování rychlosti kapaliny vede ke zvýšení rychlosti vyplouvání bubliny jednoho průměru (zelená) [17].

Nejjednodušším případem **trajektorie** (obrázek 13) při vyplouvání bubliny by se ve stacionární klidné kapalině jevila přímka – bublina tedy stoupá svisle vzhůru. Tomuto pohybu by odpovídaly malé bubliny při nízkých hodnotách Reynoldsova kritéria. Avšak pohyb bubliny je ovlivněn řadou faktorů. Při vyplouvání se plynná bublina snaží najít cestu nejmenšího odporu, přičemž největší odpor je na jejím vrcholu. Celkový menší odpor je poté zaznamenán, jestliže se bublina při svém pohybu mírně odkloní od přímočarého pohybu. Takovou trajektorií může být symetrická šroubovice, eliptická šroubovice nebo kolébavý pohyb (cikcak). S rostoucí velikostí samotné bubliny se komplikuje i její pohyb. V případě vody bylo zjištěno, že malé bubliny následují trajektorii šroubovitou nebo cikcak, zatímco velké bubliny opisují trajektorii spirálovitou [40].



Obrázek 13. Trajektorie vyplouvajících bublin ve stacionární kapalině o různé velikosti (d_b) aplikovaných z různě velkých trysek (D_o): (a) pohyb přímočarý, kulovitý tvar; (c)–(e) se zvětšujícím se parametrem d_b se bublina zpočátku pohybuje přímočaře až do určité vzdálenosti, kde dochází k odklonu a cikcak pohybu, tvar bubliny se mění z kulovitého na elipsoidní nebo zploštěle elipsoidní; s dalším zvětšováním velikosti bubliny dochází k jejímu většímu zploštění a bublina opisuje rovnou trajektorii cikcak (f) [10].

3.3.4 Síly působící na bubliny

Na bublinu vyskytující se v tekutině působí hned několik složek sil již od jejího vzniku. Směrem vzhůru na bublinu působí hydrostatická síla ($\rho_L g V_B$), proti které působí síla gravitační ($\rho_g g V_B$). Výsledná, tíhová síla působící na bublinu ve směru vzhůru je tedy dána spojením těchto dvou sil (29).

$$F_G = (\rho_L - \rho_g) g V_B \quad (29)$$

Vzhledem k tomu, že plyn obsažený v bublině je v porovnání k objemu kapaliny zanedbatelný, je gravitační síla také zanedbatelná a vztah (29) přechází na vztah (30):

$$F_G \approx \rho_L g V_B \quad (30)$$

V průběhu stoupání bubliny v tekutině ovšem přibývá faktorů, sil, působících na bublinu.

Rostoucí rychlost vyplouvání má za následek nárůst vlivu odporové síly prostředí (31), ve kterém se bublina pohybuje, proti směru pohybu vzhůru a je úměrná čelní

ploše S obtékaného tělesa. Vzhledem k tomu, že odporový koeficient C_D je odvozen pro tělesa kulového tvaru, používá se modifikovaný odporový koeficient C , který vychází ze známé čelní plochy S_e ekvivalentní koule (32). Modifikovaný odporový koeficient je možné určit z průměrné hodnoty mezní rychlosti (konečné rychlosti vyplouvání). Tj. takové rychlosti, kdy je síla tíhová v rovnováze se silou odporovou ($F_G = F_H$). Odporová síla je pak vyjádřena vztahem (33).

$$F_D = C_D \frac{\rho_L u_L^2}{2} S \quad (31)$$

$$S_e = \frac{\pi}{2} d_e^2 \quad (32)$$

$$F_D = C \frac{\rho_L u_L^2}{2} S_e \quad (33)$$

Jako protisíla k síle tíhové a odporové působí síla povrchového napětí (34), která působí tak, aby byl tvar bubliny co nejkulatější. Působí kolmo na element mezifázového povrchu S_B a v každém bodě na zakřivení fázového rozhraní, které je vyjádřeno dvěma hlavními poloměry zakřivení R_1, R_2 [11].

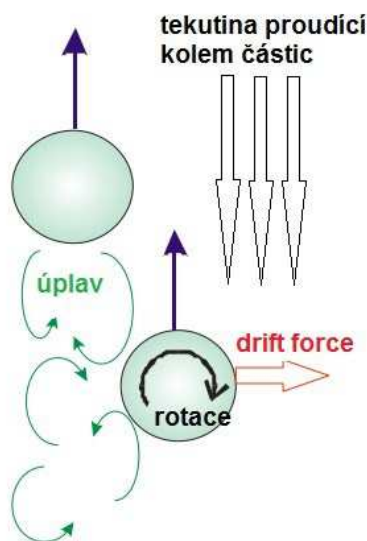
$$\frac{\Delta F_S}{\Delta S_B} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (34)$$

3.3.5 Drift bublin

V případě, že uvažujeme výskyt dvojice bublin v proudící kapalině, dochází k jejich vzájemnému ovlivňování v závislosti na jejich vzdálenosti. Z teorie i experimentálních dat vyplývá, že čím je vzdálenost mezi bublinami menší, tím je vliv jedné na druhou významnější. Jedním z jevů vznikajících v důsledku výskytu dvojice bublin v proudu kapaliny je rotace bubliny. K té dochází nejpravděpodobněji u bubliny v pořadí druhé, a to v důsledku jejího výskytu za bublinou první, která během svého, nejčastěji stoupajícího pohybu, za sebou zanechává úplav a tvoří víry.

Tato rotace poté způsobuje driftovou sílu (označovanou v anglické literatuře jako „drift force“) působící na těleso ve směru kolmém ke směru proudění, orientovanou ve směru menšího rozdílu mezi rychlostí povrchu tělesa a okolní tekutiny. Bublina se tedy pohybuje jak ve směru vertikálním, tak ve směru horizontálním, a je vynášena z oblasti úplavu bubliny první (obrázek 14). Vzhledem k tomu, že velikost rychlosti driftové síly je

řádově stejná jako velikost vzestupné rychlosti, má také driftová síla značný vliv na tvar trajektorie pohybujících se bublin [6], [41].



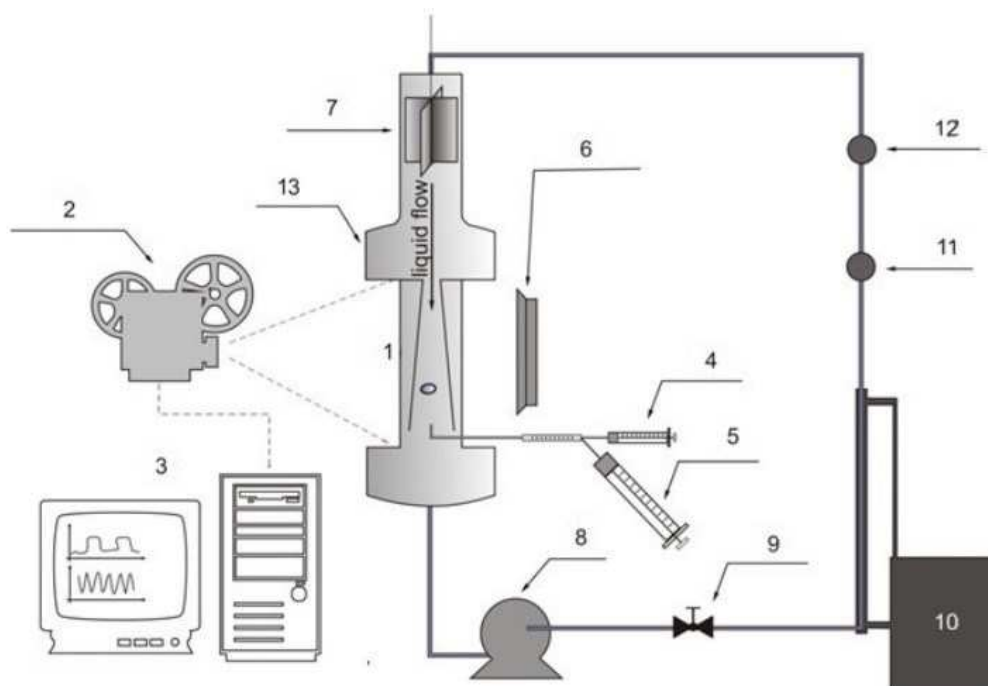
Obrázek 14. Pohyb bubliny z oblasti úplavu, směr rotace a působení driftové síly [41].

Vznik úplavu a vírů závisí na faktorech, jako je čistota a viskozita systému, ve kterém se bublina pohybuje, velikost a tvar bublin, ale také na parametrech kanálu, ve kterém se bublina pohybuje. Víry jsou charakterizovány již zmiňovaným Strouhalovým kritériem. Nicméně je v současné době stále nedostatek experimentálních údajů, které by popisovaly vír a úplav tvořící se za vyplouvající bublinou, stejně tak jako je nedostatek těchto údajů pro dvojice bublin.

4 Experimentální část

4.1 Experimentální zařízení

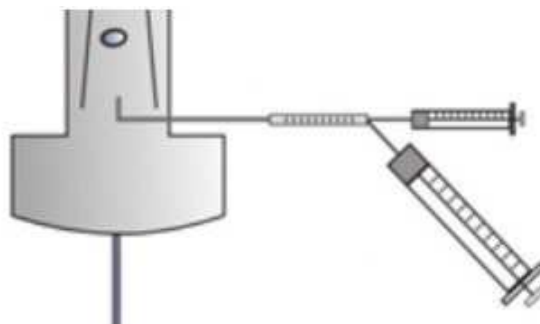
Experimentální aparatura (obrázek 15) byla sestavena z dílů vyrobených ze sodného skla a nosné konstrukce vytvořené z perforovaných kovových profilů.



Obrázek 15. Schéma experimentální aparatury. (1) kuželový kanál v zorném poli snímací jednotky, (2) snímací jednotka – obvykle rychloběžná kamera, (3) řídicí počítač, (4) generátor bublin, (5) dávkovač bublin do kuželového kanálu, (6) osvětlení (halogenová světla), (7) míchadlo usměřující tok kapaliny, (8) čerpadlo zajišťující oběh kapaliny, (9) škrťací ventil, (10) chladicí okruh, (11) průtokoměr, (12) teploměr, (13) válcová sekce [6].

Její nejdůležitější součástí je skleněný kuželový kanál [obrázek 15/(1)]. Rychlostní profil je v jeho oblasti mimo mezní vrstvu plochý, s relativně malou mírou turbulence (ověřeno předchozími experimenty na této aparatuře). Do tohoto kanálu je dvojice bublin dané velikosti zavedena (obrázek 16) a proudící kapalinou je udržována v zorném poli kamery – ve středu kuželového kanálu, což umožňuje pořízení „libovolně“ dlouhého záznamu. Pohyb kapaliny je zajištěn čerpadlem, jehož technické parametry jsou znázorněny v tabulce 2. Délka záznamu je ovlivněna parametry, jako jsou kapacita použité rychloběžné kamery, rychlost přenosu dat z kamery na záznamové zařízení nebo životnost bublin, které v průběhu experimentu mohou podléhat rozpadu, koalescenci nebo např. rozpouštění v dané kapalině. Kuželový kanál je umístěn v hranaté skleněné cele o rozměrech 100x100x300mm,

kteřá navazuje na válcovou sekci [obrázek 15/(13)]. Válcová sekce slouží ke zklidnění proudění kapaliny a jeho homogenizaci. Míchadlo [obrázek 15/(7)] umístěné nad touto sekci uvádí proudící kapalinu do rotace. Vzniklá odstředivá síla pomáhá „udržovat“ dvojici bublin v blízkosti osy kanálu, kde je rychlostní profil proudící kapaliny plochý a vliv stěn kuželového kanálu na chování dvojice je minimální. V horní části je k aparatuře připojena vývěva sloužící k vytvoření vakua a napuštění aparatury měřicím roztokem. Objem celé aparatury činí přibližně 30 litrů.



Obrázek 16. Zařízení pro aplikaci bublin. Požadovaný objem dvojice bublin se nastaví na Eppendorfově pipetě a je vpraven do skleněné kapiláry umístěné pod kuželovým kanálem. Pomocí injekční stříkačky jsou bubliny vpraveny proudem kapaliny do skleněného kuželového kanálu. Skleněná kapilára je opatřena orientační stupnicí, která slouží ke kontrole správného objemu dávkovaných bublin. Kapilára je na svém konci mírně rozšířená, ohnutá proti směru proudění a vyústí v ose kuželového kanálu [6].

Tabulka 2. Technické parametry užitého čerpadla.

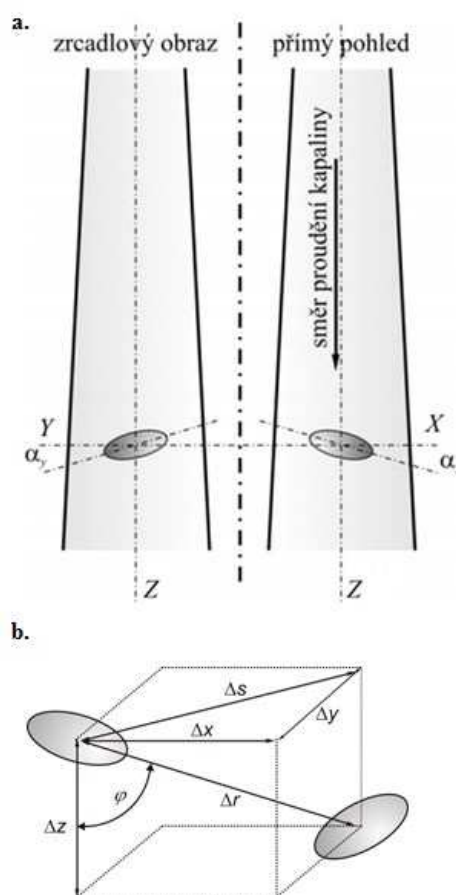
Typ	CDXM/A 70/07
Průtok	20,0-80,0 l·min ⁻¹
Výtlačná výška	28,0-20,5 m (max. 30,0 m)
HP	0,75
Frekvence	50 Hz
Výkon	P ₁ 1,1 kW, P ₂ 0,55 kW
Max. teplota média	60°C

Proudící kapalina je v průběhu experimentu chlazena dvěma chladiči [obrázek 15/(10)]. První – externí – je konstruován jako trubka v trubce a je umístěn v přímé části aparatury, kde je chlazení kapaliny zajištěno jejím protékáním vně vnitřní trubky chladiče (vybrané technické parametry viz tabulka 3). Druhý, trubkový had s dvaceti závity, je umístěn v hlavě kolony.

Tabulka 3. Vybrané technické parametry externí chladicí jednotky Frigera CHV 1.7

Chladicí výkon při teplotě okolí 32 °C	1700 W
Min. a max. teplota okolí při provozu	15-32 °C
Max. teplota vody v nádrži při provozu	40°C
Min. a max. tlak vody na výstupu zařízení	0,5 bar; 2,5 bar
Průtok vody (0,5–2,5 bar)	20-38 L·min ⁻¹

Experimentální aparatura je také opatřena zrcadlem umístěným vlevo od kuželového kanálu, resp. od skleněné cely [obrázek 17/(a.)]. Zrcadlo zajišťuje pohled z boku, který spolu s přímým pohledem poskytuje po celou dobu pořizování obrazového záznamu ucelenou informaci o tvaru, pozici a vzájemné interakci sledovaných bublin v levoprávé a předozadní projekci. Pořízený záznam se tak stává záznamem 3D [obrázek 17/(b.)], kdy máme informace o bublině v souřadnicích [x, y, z].



Obrázek 17. Přímý a zrcadlový pohled na kuželový kanál (a.). Zobrazení vzájemného postavení dvou bublin v 3D projekci (b.) [6].

4.2 Průběh experimentálního měření

Experimentální aparatura byla pomocí vytvořeného vakua napuštěna z barelu danou kapalinou. Následovalo spuštění chlazení, míchání a čerpadla. Chlazením kapaliny bylo předcházeno jejímu ohřevu způsobenému osvětlením a samotným čerpadlem, a kapalina tak byla udržována na experimentální teplotě, tj. teplotě v laboratoři. Pomocí dávkovače byla do kuželového kanálu vpravena dvojice bublin shodné velikosti o objemu v rozmezí 25-200 μL . Průtok kapaliny byl nastaven tak, aby se bubliny pohybovaly co nejvíce ve středu kanálu bez přílišných odchylek ve vertikálním směru. V okamžiku, kdy bylo dosaženo „požadovaného“ umístění bublin, byl spuštěn kamerový záznam. Po ukončení a uložení obrazového záznamu byla injektována dvojice bublin jiné velikosti s pořízením nového záznamu. Po ukončení měření v dané kapalině byl odebrán jeden litr kapaliny pro následné stanovení jejich fyzikálně chemických vlastností. Následovalo vypuštění aparatury, její vyčištění kohoutkovou vodou a zahájení nového měření v další kapalině.

Měření probíhala v daných kapalinách – voda, chlorid draselný (KCl), síran sodný (Na_2SO_4), dodekahydrát fosforečnanu trisodného ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, dále značen jen Na_3PO_4), hexahydrát dusičnanu hořečnatého ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, dále značen jen $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$), glycerín, butanol – a byla zaznamenána na rychloběžnou digitální kameru značky Olympus i-SPEED 2 (viz tabulka 4). Roztoky byly připraveny rozpuštěním čistých látek od společnosti Penta v destilované vodě. Přesnost zvolených koncentrací připravených roztoků byla ověřena na základě hodnoty vodivosti kapaliny v barelu, která byla porovnána se sestavenou koncentrační závislostí daného roztoku na vodivosti. Přesnost koncentrací použitých roztoků solí je uvedena v příloze 1, 2, 3 a 4.

Tabulka 4. Technické parametry použité rychloběžné kamery Olympus (i-SPEED 2).

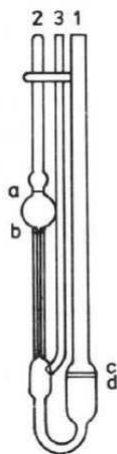
Objektiv	PENTAX 12,5–75,0 mm, 1:1,8; 50,0 mm a F4
Frekvence snímání obrazu	150 fps
Rozlišení	800x600 pix
Počet snímků na záznam	~8947
Velikost souboru	~12 GB
Délka záznamu	59,6 s
Délka přenosu dat	~120 min
Celková velikost pořízených dat	~770 GB

Do laboratorního deníku (příloha 5) byly zaznamenány hodnoty, jako jsou teplota a průtok při daném experimentu, velikost bublin, parametry nastavení kamery a adresář, kde byla získaná data uložena. Parametry použitých kapalin a metody jejich stanovení jsou uvedeny v následující podkapitole.

4.2.1 Stanovení klíčových vlastností použitých roztoků

4.2.1.1 Kinematická viskozita

K měření viskozity byl použit Ubbelohdeho kapilární viskozimetr (obrázek 18). Viskozimetr byl naplněn měřenou kapalinou. Po vytemperování na požadovanou teplotu (21,1 °C – teplota se směrodatnou odchylkou $\pm 0,5$ °C od teploty experimentálních měření pro vodu a roztoky solí, 22,2 °C pro butanol a glycerín) byla kapalina nasáta do baňky nad rysku a. Poté se kapalina nechala desetkrát protéct mezi značkami (a, b) a pro každý průtok byla zaznamenána doba jeho trvání. Specifika použitých viskozimetrů jsou uvedena v tabulce 5. Výsledné hodnoty viskozity jsou zaznamenány v tabulce 6.



Obrázek 18. Ubbelohdeho kapilární viskozimetr. (1) trubice pro naplnění viskozimetru měřenou kapalinou s objemem mezi ryskami c a d, (2) měřicí trubice s kapilárou, (3) zavzdušňovací trubice, a–b rysky pro měření průtoku [42].

Pro výpočet kinematické viskozity se užívá vztahu (35):

$$\nu_k = kt \quad (35)$$

Kde:	k	Kalibrační konstanta přístroje	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)
	t	Doba průtoku kapaliny	(s)

Tabulka 5. Specifika použitých viskozimetrů.

	Číslo oddílu	Č. viskozimetru	Velikost	Konstanta	Měřené kapaliny
1.	CV003-103	6308	I	0,011391	Voda, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$
2.	CV003-105	6269	II	0,080355	KCl, Na_2SO_4 , Na_3PO_4 , butanol, glycerín

4.2.1.2 Povrchové napětí a hustota

Pro stanovení těchto fyzikálních veličin byl využit víceúčelový tenziometr značky KRÜSS (obrázek 19). Přístroj umožňuje rychlou kontrolu teploty v rozsahu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přepínání mezi jednotlivými metodami je velmi jednoduché – pouhá výměna Pt-Ir kroužku za háček se standardem (křemíkový váleček) a přepnutí nastavení v kontrolním programu v PC.



Obrázek 19. Tenziometr KRÜSS K100 MK2/SF/C [43].

Povrchové napětí – ke stanovení byla využita kroužková metoda. Princip spočívá v měření maximální síly potřebné k odtržení Pt-Ir kroužku (obrázek 20) z hladiny měřené kapaliny. Pro zamezení přítomnosti nečistot a zkreslení výsledků byly měrné nádobky před měřením máčeny v kyselině chlorovodíkové, omyty destilovanou vodou a acetonem, osušeny a poté žihány v plamenu kahanu, stejně tak jako Pt-Ir kroužek. Po naplnění nádobky testovací kapalinou a umístění do přístroje byl kroužek ponořen pod rozhraní testovací kapaliny a následně zvedán nahoru spolu s meniskem kapaliny až do odtržení menisku.

Maximální povrchová síla využitá pro výpočet povrchového napětí je zaznamenána těsně před odtržením menisku [44]. Povrchové napětí je počítáno ze vztahu (36):

$$\sigma = \frac{F_{\text{MAX}} - F_V}{L \cos \theta} \quad (36)$$

Kde:	F_{MAX}	Max. síla potřebná k odtržení platinového kroužku	(N)
	F_V	Síla potřebná k vytažení kroužku	(N)
	L	Smáčená délka	(m)
	θ	Kontaktní úhel fázového rozhraní	(°deg)



Obrázek 20. Pt-Ir kroužek pro měření povrchového napětí [43].

Hustota – pro stanovení hustoty byl kroužek vyměněn za standard známé hustoty (křemík, $\rho = 2,330 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, obrázek 21) umístěný ve vertikální poloze na platinovém háčku. Přístroj automaticky detekoval výšku hladiny, ponořil standard do testované kapaliny a na základě rozdílných hmotností určil výslednou hustotu vzorku, viz rovnice (37).

$$\rho_L = \rho_{MP} \frac{G_{MPA} - G_{MPL}}{G_{MPA}} \quad (37)$$

Kde:	ρ_L	Hustota měřené kapaliny	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
	ρ_{MP}	Hustota standardu	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
	G_{MPA}	Hmotnost standardu ve vzduchu	(g)

G_{MPA} Hmotnost standardu ve vzorku (g)



Obrázek 21. Platinový háček a standard z křemíku pro měření hustoty [43].

Naměřené hodnoty vodivosti, kinematické viskozity, povrchového napětí a hustoty jsou zaznamenány v tabulce 6. Tyto hodnoty byly posléze přepočítány pro teplotní podmínky každého experimentálního měření a využity k výpočtům bezrozměrných kritérií.

Tabulka 6. Parametry použitých kapalin a měřených velikostí dvojice bublin.

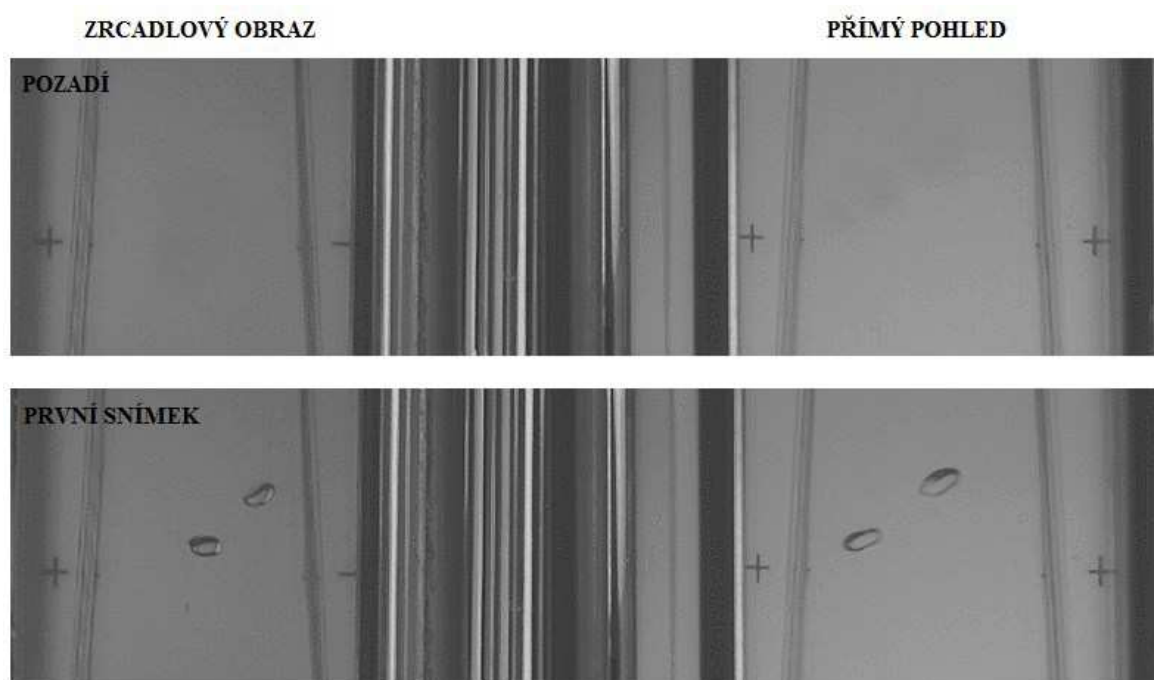
Vlastnosti →	c	Měřený objem bublin (μL)								κ	ν	σ	ρ
Kapalina ↓	$\left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)$	25	50	75	100	125	150	175	200	$\left(\frac{\text{mS}}{\text{cm}}\right)$	$\left(10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$	$\left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right)$	$\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
Voda (a)	Čistá						✓			-	0,9915	0,0652	1012,4
Voda (b)	Čistá				✓	✓		✓	✓	-	0,9892	0,0663	1005,2
Voda (c)	Čistá	✓	✓	✓						-	0,9867	0,0754	1002,0
Butanol	-	✓	✓	✓						-	2,7024	0,0236	848,4
Glycerín	-	✓	✓	✓	✓		✓			-	6,9931	0,0298	1182,6
KCl	0,05		✓		✓		✓		✓	6,70	0,9657	0,0746	1017,0
KCl	0,20		✓		✓		✓		✓	25,50	0,9652	0,0738	1029,1
KCl	0,30		✓		✓		✓		✓	36,10	0,9647	0,0687	1037,0
Na ₂ SO ₄	0,05		✓		✓		✓		✓	9,36	0,9662	0,0747	1023,0
Na ₂ SO ₄	0,20		✓		✓		✓		✓	30,00	0,9695	0,0689	1047,8
Na ₂ SO ₄	0,30		✓		✓		✓		✓	43,90	1,0452	0,0688	1061,0
Na ₃ PO ₄	0,05		✓		✓		✓		✓	12,06	0,9673	0,0702	1043,0
Na ₃ PO ₄	0,20		✓		✓		✓		✓	32,00	1,0491	0,0624	1065,0
Na ₃ PO ₄	0,30		✓		✓		✓		✓	40,10	1,1277	0,0447	1067,0
Mg(NO ₃) ₂	0,05		✓		✓		✓		✓	9,54	0,9919	0,0678	1023,0
Mg(NO ₃) ₂	0,20		✓		✓		✓		✓	32,80	1,0256	0,0531	1051,0
Mg(NO ₃) ₂	0,30		✓		✓		✓		✓	46,60	1,0484	0,0465	1060,0

4.3 Obrazový záznam a jeho vyhodnocení

Klíčem k experimentálnímu stanovení relativní rychlosti dvojice bublin v protiproudu kapaliny je analýza pořízeného obrazového záznamu. Analýza obrazového záznamu byla provedena v prostředí programu MatLab s využitím balíčku Image Processing Toolbox, využitého při předchozích pracích s touto aparaturou.

Vyhodnocení pořízeného záznamu probíhá v několika krocích:

- Ke každému experimentálnímu měření bylo sestaveno pozadí, tj. snímek neobsahující bubliny, které bylo od každého snímku matematicky odečteno (obrázek 22).



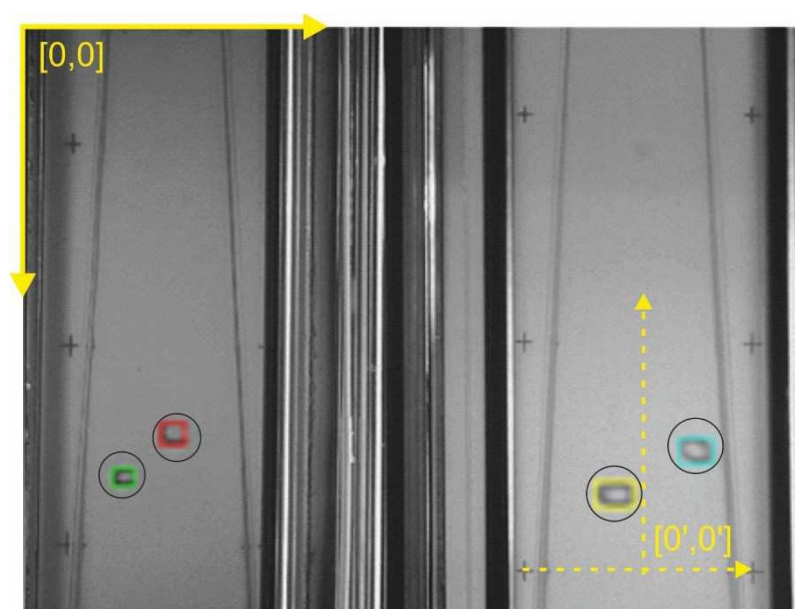
Obrázek 22. Vytvořené pozadí a originální první snímek experimentálního měření.

- Každý snímek byl převeden do stupňů šedi a pomocí vhodného nastavení prahu citlivosti byl zvýrazněn obrys bublin.
- Snímek byl převeden na binární obraz (obrázek 23) obsahující již pouze zvýrazněné hranice bublin. Čistícími parametry byly odstraněny elementy rušící kvalitu obrazu – změna světelných podmínek v průběhu pořizování záznamu, nečistoty obsažené v kapalině.



Obrázek 23. Binární zobrazení originálního snímku.

- Poslední krok spočíval v určení souřadnic zbývajících objektů – čtyř bublin. Kolem každé z bublin byl vytvořen pravidelný čtyřúhelník, do kterého bublina natěsno pasovala. Z tohoto čtyřúhelníku byly odečteny minimální a maximální hodnoty na ose X, Y, resp. na ose Z, Y vzhledem k původnímu souřadnému systému. Výsledné hodnoty souřadnic, získané v pixelech, bylo tedy nutné převést do metrického systému. K tomuto účelu sloužily kalibrační značky umístěné za skleněnou celou a po její straně. Osa nového souřadného systému byla umístěna do středu kužellového kanálu a byla zarovnána k dolním křížkům (obrázek 24). Převod byl založen na manuálním určení souřadnic křížku pro každý jeden snímek ze série experimentálních měření a následném přepočtu v prostředí programu MatLab.



Obrázek 24. Původní $[0, 0]$ a nový $[0', 0']$ souřadný systém pro přepočet souřadnic bublin z pixelů na milimetry vzhledem k ose kužellového kanálu a detekci bublin na obrázku.

- Do MatLab kódu byly zapsány potřebné informace ke všem měřením (obrázek 25) a program byl spuštěn.

```
%% Destilovana voda 2 x 50 mkl
clear all;

id = 'A_Destilovana_voda\'; % adresar
sample = 'destilovana_voda_2x50\'; % sample name
imgExt = 'bmp'; % image file extension
expDate = '18_02_2016'; % specific part of data structure

liq = 'Dist water' ;
conc = 0;
BubbVol = 50; % bubble volume XXX mkl
showFigs = 1; % to do not see the figures set showFigs = 0;

% parametry
% teplota
teplota = 21.5; % °C
% prtok
Qliq = 24.8; % lit/min
otacky_michadia = 0.2861375; % otacky
Fs = 150; % frekvence snimani
% geometrie

% image analysis
low_in = 0.453;
high_in = 0.746;
gamma = 0.5;

cpl = 40; % cistici parametr, do funkce bwareopen vzdy "sude", protoze cpl
posun = 150; % posun ramecku
step_x = 8; % parametr pro statistiku hist3
try
    LowInHighIn;
    twoBubblesIADetail;
    Analysis;
    CreateMap;
    saveFigs;
end
```

Obrázek 25. Úvodní část kódu v programu MatLab.

- Výsledkem image analýzy byla analytická tabulka polohy každé bubliny v pixelech (obrázek 26).

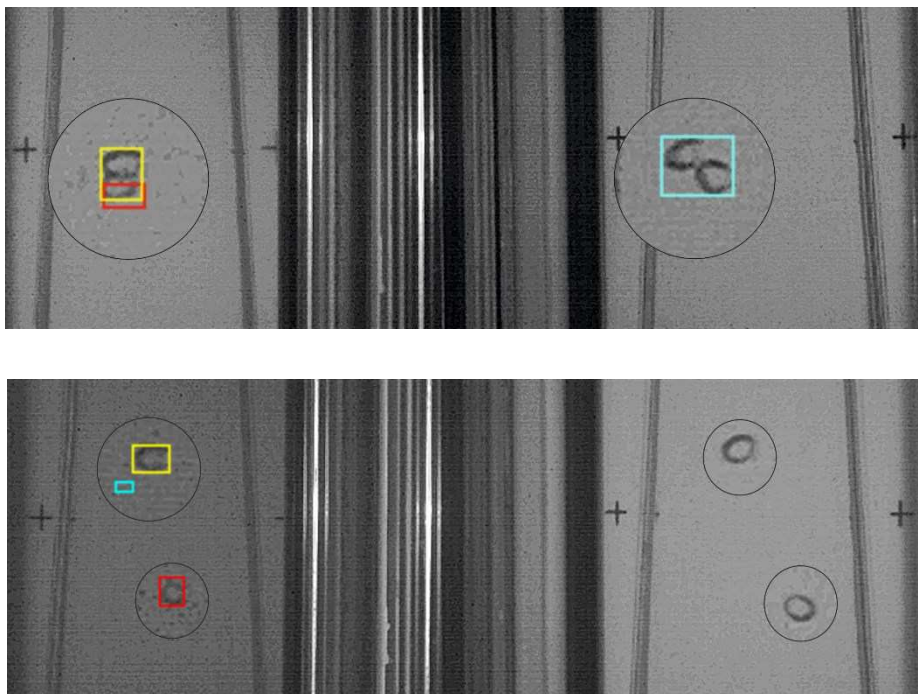
i	Y1	Z1	Y2	Z2	X1	Z1	X2	Z2
0	89.50	350.00	90.50	369.00	597.50	347.50	613.50	371.00
1	91.00	348.00	92.50	367.50	596.00	345.50	613.00	368.50
2	92.00	346.00	96.00	365.50	594.50	344.00	613.00	367.00
3	93.50	343.50	98.00	364.00	594.50	341.50	612.00	364.50
4	94.50	341.50	100.50	362.00	595.50	338.50	612.00	361.50
5	96.00	341.00	104.50	359.50	596.50	337.00	611.00	359.00
6	97.50	338.50	108.00	357.50	598.00	335.50	611.00	357.00
7	99.50	338.00	111.00	354.50	600.00	335.00	611.00	354.50
8	103.00	336.50	113.50	354.00	601.50	332.00	611.00	353.00
9	103.50	335.00	117.50	353.00	602.50	331.50	610.50	351.50
10	106.00	334.50	120.00	351.50	604.00	330.00	608.50	349.50
11	108.50	333.50	122.00	351.00	605.50	329.50	607.50	349.00
12	109.00	331.50	125.00	349.50	603.50	348.00	606.00	328.50
13	110.50	331.00	126.50	348.50	602.00	346.50	606.50	327.00
14	113.00	330.00	128.00	347.50	600.00	345.50	607.50	326.00
15	114.00	329.00	127.50	346.00	598.50	344.00	607.50	324.00
16	117.00	329.00	127.00	345.00	597.00	343.00	605.50	323.50
17	118.50	327.00	126.50	344.00	596.50	341.50	604.50	322.50
18	119.59	324.38	126.50	343.00	596.29	336.95	601.65	321.23
19	120.91	324.60	125.76	341.98	597.88	340.13	598.82	319.10
20	122.55	324.83	125.32	340.33	598.68	333.78	596.70	321.93
21	124.04	325.08	123.95	338.24	601.06	330.60	588.21	323.35
...
8946	123.82	303.08	117.09	328.21	600.24	322.64	620.05	296.46

Obrázek 26. Analytická tabulka s polohami dvojice bublin zaznamenaná v pixelech.

4.3.1 *Ověření správnosti programu*

Ke správné detekci je zapotřebí velmi přesné nastavení hodnot parametru citlivosti („LowInHighIn“). Standardně se pak tento kód používá s nastavením parametru „showFigs“ rovnému nule, vizuálně tedy není pozorována detekce objektů. Pro ověření správnosti detekce byl pro první experimentální měření spuštěn program s nastavením parametru „showFigs“ rovnému jedné. Při vyhodnocení lze bohužel pozorovat chybu v detekci čtveřice bublin, a to od snímku „n“ až do konce celé sady obrázků. Této chybě naneštěstí podléhají všechna experimentální měření.

V momentě, kdy se bubliny svými okraji na obrázku dotýkají, nebo se částečně či úplně překrývají, je dvojice bublin detekována pouze jako jeden objekt. S tímto velmi častým jevem program počítá, a zapíše tak pro obě bubliny stejné souřadnice. Chyba nastává hned na dalším snímku („n“), kde jsou opět viditelné obě dvě bubliny. Od tohoto snímku až do konce série program nedetekuje bubliny, resp. detekuje bubliny s chybným zapsáním pozice. U některých experimentálních měření ovšem dochází k problému v detekci i při dostatečné vzdálenosti bublin. Příklady chybné detekce uvádí obrázek 27. Chybu v detekci potvrzuje nejen vizuální kontrola, ale také výsledná analytická tabulka (obrázek 28).



Obrázek 27. Příklady chybné detekce čtyř bublin v průběhu experimentálního měření.

i	Y1	Z1	Y2	Z2	X1	Z1	X2	Z2
...
149	111.50	301.50	121.00	280.50	617.00	310.50	635.00	287.00
150	115.00	299.50	122.00	281.50	619.50	310.50	636.50	287.50
151	117.50	300.00	122.50	280.00	621.50	309.50	639.00	286.50
152	121.50	299.00	124.00	279.50	625.00	308.00	640.50	285.50
153	125.00	278.00	125.00	298.50	628.50	306.50	641.00	285.00
154	125.00	278.00	128.50	298.50	631.00	307.00	640.50	284.50
155	125.00	278.00	131.50	297.50	635.00	307.00	638.50	283.50
156	127.00	277.50	133.50	297.00	636.00	284.00	639.00	306.50
157	127.00	277.50	135.50	297.50	634.50	283.00	642.00	306.00
158	128.50	277.00	136.50	296.50	632.50	283.00	644.00	305.00
159	130.50	277.50	136.50	296.50	631.50	283.00	645.00	305.00
160	133.00	277.00	137.50	295.50	133.00	277.00	645.00	305.00
161	135.00	277.00	138.00	295.00	135.00	277.00	138.00	295.50
162	137.50	277.00	138.00	294.50	137.50	277.00	138.00	294.50
163	138.50	293.50	140.00	276.50	138.50	293.50	140.00	276.50
164	139.50	293.00	143.00	276.00	139.50	293.00	143.00	276.00
165	141.00	292.50	144.50	275.00	141.00	292.50	144.50	275.00
166	142.50	291.50	146.00	274.00	142.50	291.50	146.00	274.00
167	144.00	289.50	147.00	274.00	144.00	289.50	147.00	274.00
168	146.00	287.50	148.00	272.50	146.00	287.50	148.00	272.50
169	148.00	272.50	148.50	285.50	148.00	272.50	148.50	285.50
...
8946	80.50	252.00	93.00	264.00	80.50	252.00	93.00	264.00

Obrázek 28. Analytická tabulka s chybným záznamem polohy dvojice bublin zaznamenaná v pixelech.

4.3.2 Problémy zpracování obrazu bublin programem MatLab

Problém neuspokojivé identifikace bublin na obraze vyplývá z několika pravděpodobných nedostatků nastavení použitého programu, které bude nutno dále testovat:

1) Nastavení odstínu šedé na pozadí, od něhož se bublina svým jasnem liší. Je praktické (z důvodu menší početní pracnosti) nevybírat celý snímek, ale jen malé okolí bubliny, v jehož mezích lze novou polohu očekávat. Zvláštním způsobem je nutno ošetřit situace, kdy druhá bublina může do tohoto okolí zasáhnout.

2) Nastavení rozdílu kontrastu mezi zvoleným šedým odstínem pozadí a mezi obrazem, ve kterém se bublina očekává. To je nutné proto, aby nebyly identifikovány cizí nepatrné plochy. Bublina má zpravidla temnější barvu, ale obsahuje i světlejší odlesky. Ze souboru odlišných bodů přiměřené velikosti se pak musí bublina rekonstruovat jako souvislé pole, převážně konvexní.

3) V situacích, kdy dochází k částečnému překryvu obrazů dvou bublin, je nutné identifikovat alespoň „obálku“ této plochy a při detailní analýze dat případně identifikovat vlastnosti jednotlivých bublin vizuální kontrolou.

V této práci nebyly všechny možnosti nastavení automatického vyhodnocení obrazu testovány a část dat byla získána vizuální kontrolou obrazu.

4.3.3 Analýza obrazu s vizuálně řešenými problémy

Vzhledem k tomu, že program nefungoval tak, jak se předpokládalo, byl zvolen alternativní přístup k získání potřebných dat.

Série snímků vybraných experimentálních měření byla rozdělena do dvou sad. První sada snímků byla vyhodnocena ve stávajícím programu a druhá sada snímků byla vyhotovena ručně.

Z důvodu časové náročnosti ručního vyhotovení byla tímto způsobem vyhodnocena pouze část všech měření. Tabulka 7 uvádí, která experimentální měření byla vybrána a procentuální zastoupení ručně vyhotovených snímků z celkového množství přibližně 8 950 snímků/experiment.

Tabulka 7. Přehled vyhodnocených experimentálních měření se zastoupením ručně vyhodnocených snímků (x).

Kapalina (adresář)	x
Voda_2x50	15 %
Butanol_2x50	10 %
Glycerin_2x50	8 %
KCl_0.3M_2x50	100 %
Na ₂ SO ₄ _0.3M_2x50	15 %
Na ₃ PO ₄ _0.3M_2x50	25 %
Mg(NO ₃) ₂ _0.3M_2x50	20 %

5 Výsledky a diskuse

5.1 Stanovení relativní rychlosti dvojice bublin

Pro vyhodnocení relativní rychlosti dvojice bublin byl kuželovitý kanál pro zjednodušení uvažován jako válec.

- Pozice každé bubliny byla z kartézského systému souřadnic $[x, y, z]$ převedena do válcového systému souřadnic $[r, \varphi, z]$.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (38)$$

$$\varphi = \arctg2(y, x) \quad (39)$$

$$z = z \quad (40)$$

- Pro eliminaci vlivu míchadla (rotace kapaliny/bublin) byla od složky φ , resp. od úhlové rychlosti bubliny (ω_B) odečtena úhlová rychlost otáček míchadla (ω_M), čímž byla získána nová, korigovaná, úhlová rychlost bubliny (ω_k), (43).

$$\omega_B = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (41)$$

$$\omega_M = 6,28318530718 f_{RPS} \quad (42)$$

$$\omega_k = |\omega_B - \omega_M| \quad (43)$$

Kde:	ω	Úhlová rychlost	($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
	f_{RPS}	Otáčky míchadla	($\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$)

- Relativní rychlost dvojice bublin (48) byla spočítána jako rozdíl rychlosti každé z bublin.

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (44)$$

$$v_{\varphi_k} = r \frac{d\varphi_k}{dt} = r \frac{\Delta\varphi_k}{\Delta t} = r\omega_k \quad (45)$$

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (46)$$

$$v_B = (v_r^2 + v_{\varphi_k}^2 + v_z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (47)$$

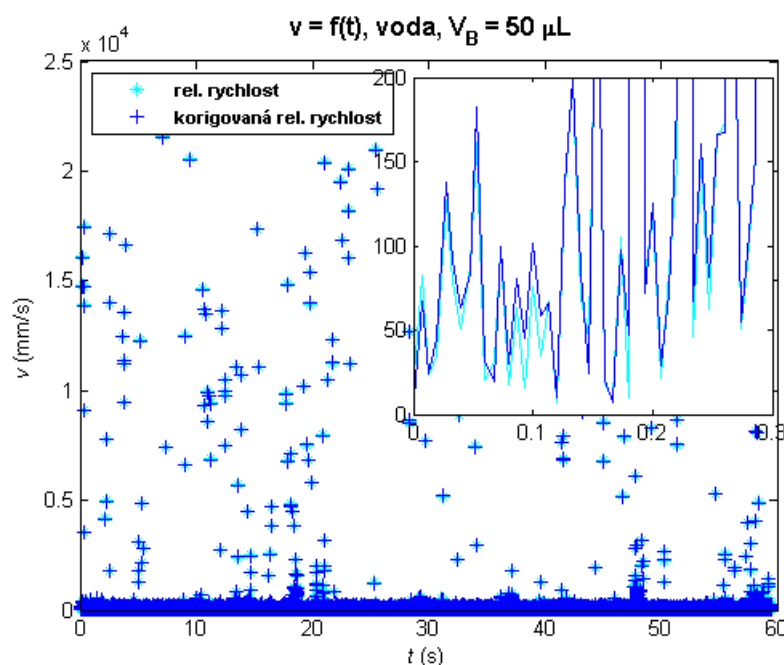
$$v_{\text{rel.}} = |v_{B1} - v_{B2}| \quad (48)$$

- Jako další parametr byla počítána radiální (49) a vertikální (50) vzdálenost mezi dvojicí bublin. K výpočtu vertikální vzdálenosti byly využity hodnoty zetových souřadnic zaznamenané z přímého pohledu.

$$\Delta r = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

$$\Delta z = |\Delta z_1 - \Delta z_2| \quad (50)$$

Z grafických závislostí [obrázek 29, a následně přílohy 6-11/(a)] lze pozorovat, k jakému posunu rychlostí dochází při eliminaci vlivu rotace kapaliny na rychlost bublin. Jak je z grafů patrné, posun rychlostí není nikterak markantní, čemuž nasvědčují i průměrné hodnoty rychlostí před a po korekci ($v_B / v_{B,k}$), uvedených v tabulce 8. Z tabulky je patrné, že korekcí se rychlosti každé bubliny posouvají k vyšším hodnotám, stejně jako jejich relativní rychlost. Zanedbatelný vliv rotace kapaliny na rychlost bublin lze nejpravděpodobněji vysvětlit umístěním míchadla dostatečně vysoko nad měřicí celou a také nízkou rychlostí jeho otáčení.

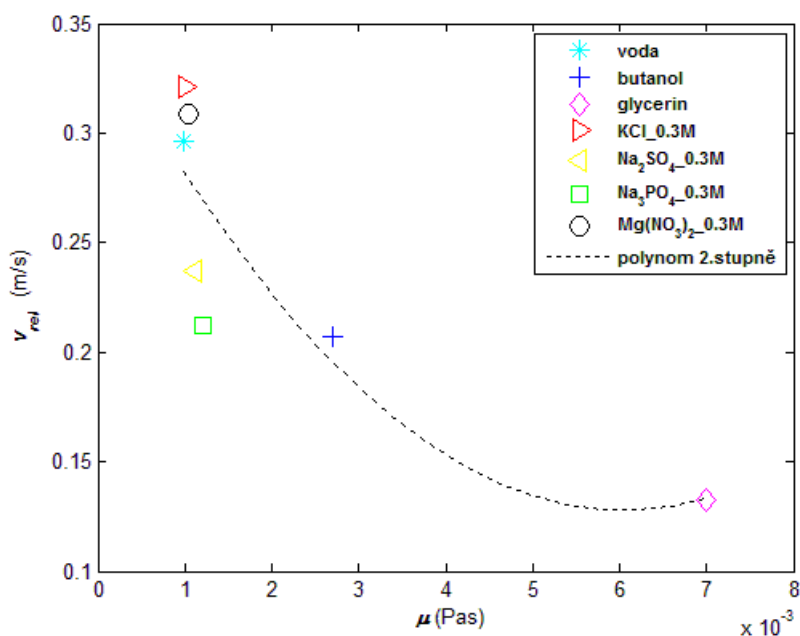


Obrázek 29. Změna relativní rychlosti dvojice bublin s časem pro destilovanou vodu a objem bublin 50µL.

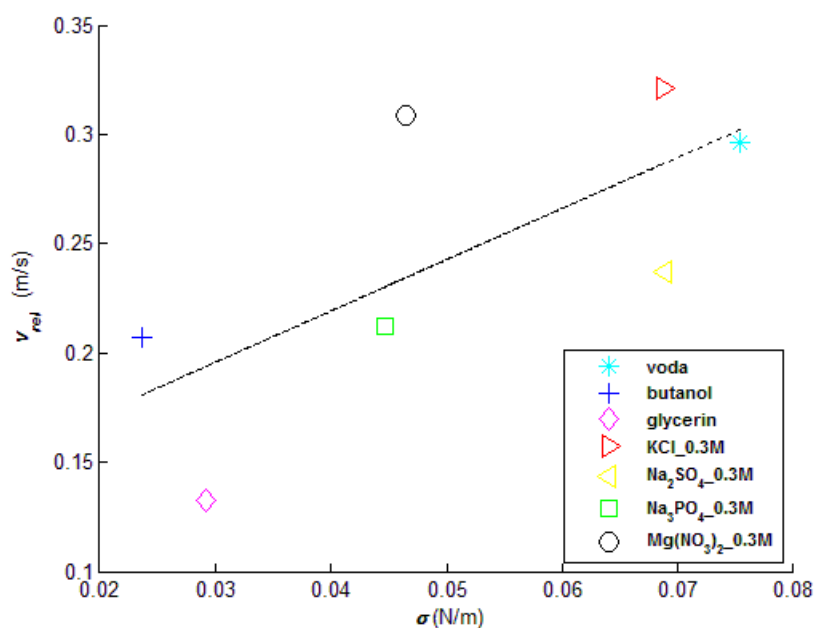
Tabulka 8. Přehled rychlostí každé bubliny o velikosti 50 μ L před a po korekci rotace kapaliny.

	VB1	VB1,k	VB2	VB2,k	VB,rel	VB,rel,k
Kapalina (adresář)	(mm·s ⁻¹)					
Voda_2x50	331,26	337,86	252,47	258,64	292,80	296,00
Butanol_2x50	236,12	245,08	185,44	196,10	203,53	206,80
Glycerin_2x50	215,63	224,25	159,79	168,02	128,52	132,39
KCl_0.3M_2x50	284,49	289,81	257,36	263,50	321,70	321,43
Na ₂ SO ₄ _0.3M_2x50	272,01	280,75	209,67	219,11	233,91	237,00
Na ₃ PO ₄ _0.3M_2x50	226,62	233,30	217,73	224,20	210,37	212,31
Mg(NO ₃) ₂ _0.3M_2x50	298,55	309,84	208,24	219,12	305,83	308,98
					průměr	244,99
					sm.odch.	68,08

Relativní rychlosti dvojice bublin o velikosti 50 μ L pohybujících se v různých kapalinách se výrazně liší od druhu kapaliny (viz tabulka 8). Z grafů závislosti relativní rychlosti dvojice bublin na fyzikálně chemických vlastnostech kapaliny jako je povrchové napětí a viskozita lze říci, že relativní rychlost exponenciálně klesá s rostoucí hodnotou dynamické viskozity (obrázek 30). Opačný jev lze pozorovat u povrchového napětí. Nárůst rychlosti s rostoucím napětím již není tak prudký (obrázek 31).

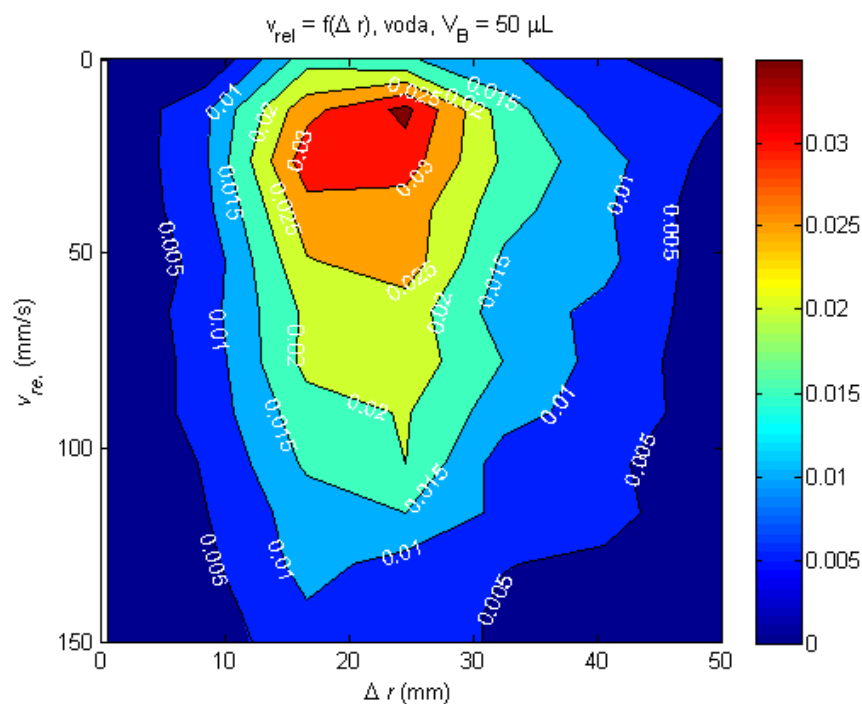


Obrázek 30. Změna relativní rychlosti dvojice bublin s dynamickou viskozitou použitých kapalin.

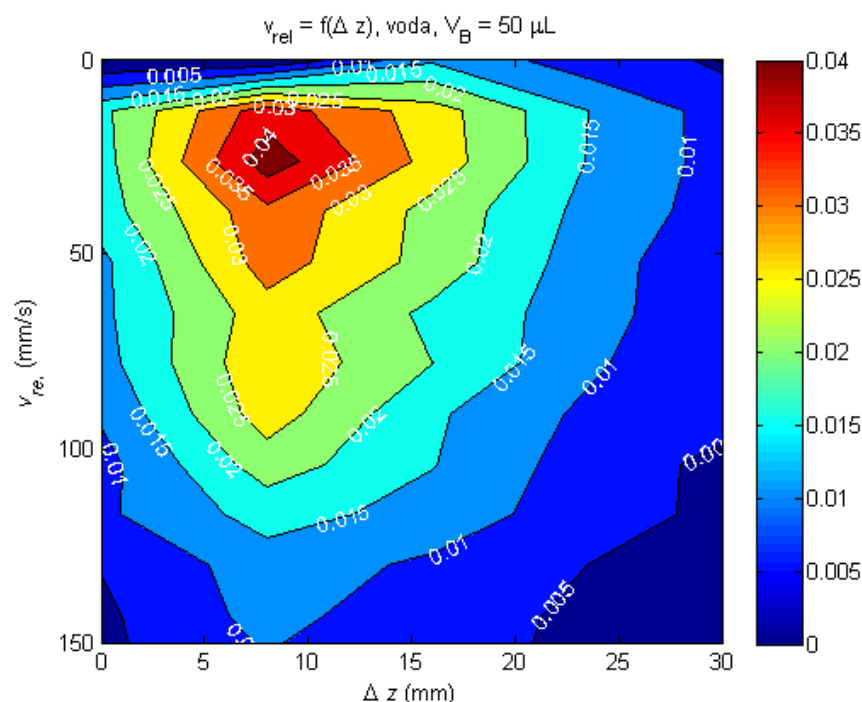


Obrázek 31. Změna relativní rychlosti dvojice bublin s povrchovým napětím použitých kapalin.

Experimentální data dle předpokladů ukazují, že nejnižší relativní rychlost dvojice bublin pohybujících se v protiproudu kapaliny, je při jejich nejmenší vzdálenosti - radiální i vertikální (obrázek 32 a 33). Resp. nejnižší rychlost je v poloze nejčastějšího výskytu dvojice bublin a roste s jejich vzdáleností, dále viz přílohy 6-11/(c,d).



Obrázek 32. Zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální vzdálenosti.



Obrázek 33. Zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich vertikální vzdálenosti.

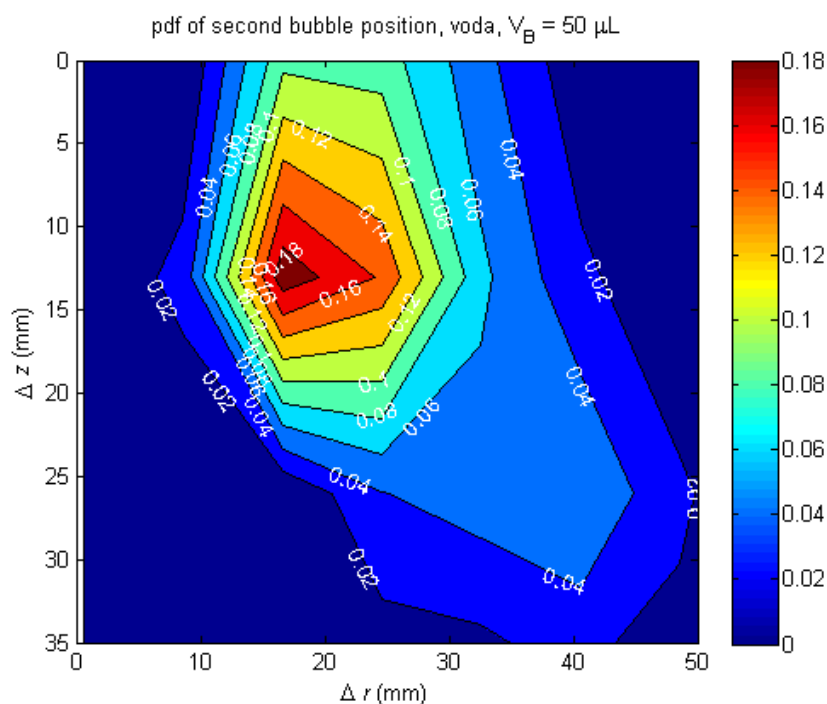
5.1 Mapy hustot pravděpodobnosti výskytu dvojice bublin

Mapy hustot pravděpodobnosti výskytu (PDF) dvojice bublin popisují, v jaké vzájemné poloze se dvojice v průběhu experimentálního měření vyskytují nejčastěji. Jedna z bublin je fixně umístěna na počátek (poloha [0,0]) a výskyt bubliny druhé odpovídá nejtmavěji zabarvenému místu na mapě, jak je také vysvětleno v legendě (obrázek 34).

Nejčastější vzájemná poloha dvojice bublin o velikosti 50μL je vedle sebe [viz přílohy 6-11/(b), tabulka 9). Z tabulky 9 vyplývá, že nejbližší se u sebe drží bubliny pohybující se ve fosforečnanu trisodném a dusičnanu horečnatém. Nejdále pak v roztoku glycerínu.

Tabulka 9. Radiální a vertikální vzdálenosti bublin vzhledem k jejich průměru ($d_B=0,00457\text{m}$).

Kapalina (adresář)	Radiální vzdálenost	Vertikální vzdálenost
Voda_2x50	$\Delta r \approx 2,0d_B$	$\Delta z \approx 2,7d_B$
Butanol_2x50	$\Delta r \approx 2,2d_B$	$\Delta z \approx 3,1d_B$
Glycerin_2x50	$\Delta r \approx 2,7d_B$	$\Delta z \approx 4,8d_B$
KCl_0.3M_2x50	$\Delta r \approx 2,0d_B$	$\Delta z \approx 3,1d_B$
Na ₂ SO ₄ _0.3M_2x50	$\Delta r \approx 2,2d_B$	$\Delta z \approx 3,7d_B$
Na ₃ PO ₄ _0.3M_2x50	$\Delta r \approx 1,6d_B$	$\Delta z \approx 2,1d_B$
Mg(NO ₃) ₂ _0.3M_2x50	$\Delta r \approx 1,7d_B$	$\Delta z \approx 2,5d_B$



Obrázek 34. Mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin o velikosti $50\mu\text{L}$ v destilované vodě.

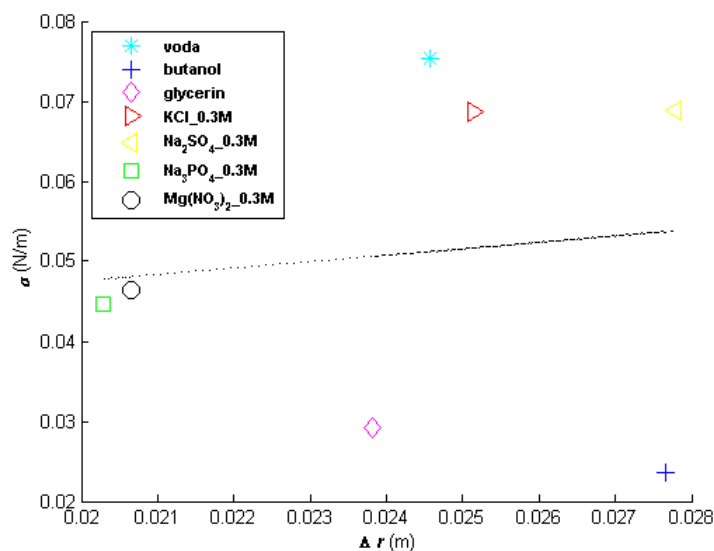
Součástí vyhodnocení experimentálních dat bylo i sestavení grafických závislostí vybraných parametrů na bezrozměrných kritériích, uvedených v příloze 12. Příloha 13 – závislost odporového koeficientu na Reynoldsově číslu potvrzuje, že bubliny menších rozměrů pohybující se v kapalinách nízké viskozity závisejí na tomto kritériu minimálně, s rostoucí hodnotou Re kritéria odporový koeficient klesá. Kritéria byla počítána ze vztahů uvedených v kapitole 3.1.

Vzhledem k velmi zredukovanému počtu vyhodnocených experimentálních měření není možno jednoznačně určit vliv fyzikálně chemických vlastností na vzájemnou pozici dvojice bublin a jejich rychlost.

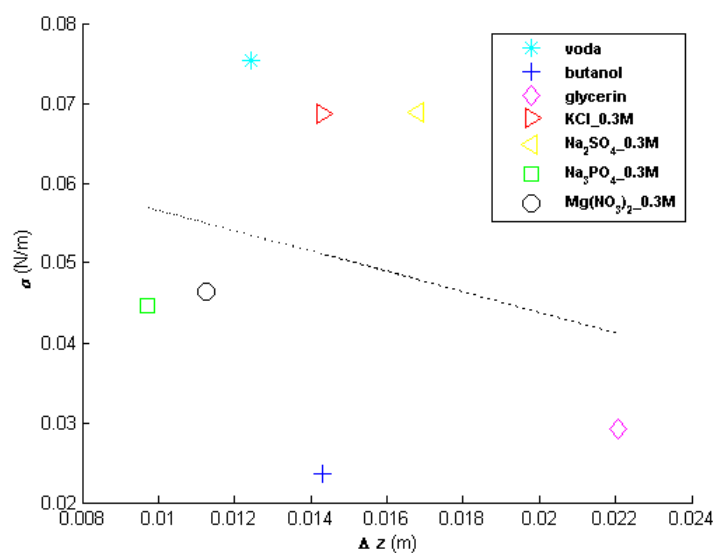
- **Vliv povrchového napětí**

Přestože byly experimenty provedeny v kapalinách rozličných vlastností, nepodařilo se stávající metodikou určit vliv povrchového napětí na chování dvojice bublin. Z vyhodnocených dat se jeví, že při nižších hodnotách povrchového napětí mají bubliny tendenci se držet blíže u sebe – toto tvrzení platí pouze pro soli (obrázek 35 a 36). Vzhledem k omezené časové kapacitě nahrávání digitální kamery nebyla v průběhu této krátké doby (zhruba 60 s) pozorována ani koalescence, ani rozpad bublin jakožto faktory ovlivněné právě povrchovým napětím. Výjimkou je roztok glycerínu, kdy při jeho vysoké

koncentraci podléhala dvojice bublin větších rozměrů těmto jevům téměř okamžitě, popř. se bubliny dostaly do oblasti mezní vrstvy. Stejně tomu bylo v případě butanolu. Právě z těchto důvodů nebyla v butanolu a glycerínu realizována experimentální měření pro bubliny větších rozměrů (viz tabulka 6).



Obrázek 35. Změna radiální vzdálenosti dvojice bublin s povrchovým napětím.

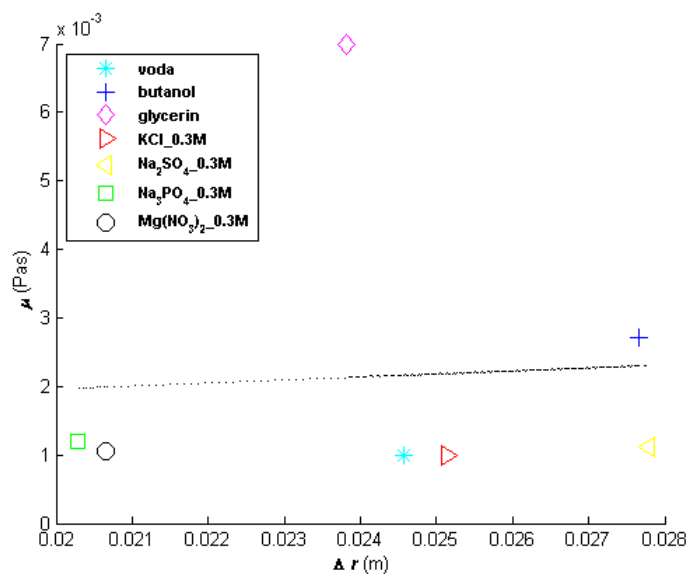


Obrázek 36. Změna vertikální vzdálenosti dvojice bublin s povrchovým napětím.

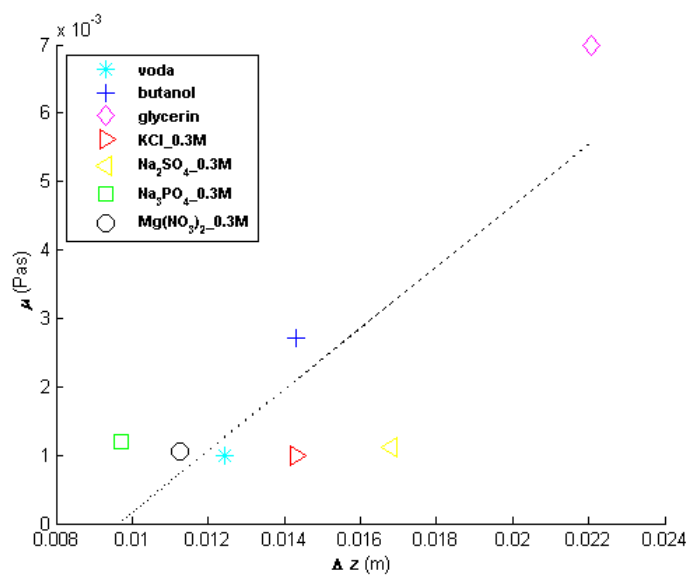
- Vliv viskozity

Významnější vliv na experimentální data mají hodnoty viskozity daných kapalin. Z grafů lze pozorovat, že s rostoucí hodnotou viskozity roste i vzdálenost mezi bublinami, a to v obou směrech (obrázek 37 a 38). Omezený počet vyhodnocených experimentálních měření neumožňuje srovnání vlivu viskozity na vzdálenost bublin větších rozměrů.

Vyvozené závěry potvrzují i grafy bezrozměrných kritérií obsažených v příloze 12.



Obrázek 37. Změna radiální vzdálenosti dvojice bublin s dynamickou viskozitou.



Obrázek 38. Změna vertikální vzdálenosti dvojice bublin s dynamickou viskozitou.

6 Souhrn

Experimentálním měřením bylo podrobeno patnáct druhů připravených kapalin odlišných fyzikálně chemických vlastností a v každé z kapalin byly realizovány experimenty s různým objemem dvojice bublin. Experimenty byly zaznamenány na vysokorychlostní kameru s následným zpracováním obrazu v prostředí programu MatLab. Před spuštěním obrazové analýzy pro všechna měření byla ověřena správnost funkčnosti kódu. Vizuální kontrola detekce bublin poukazuje na chybnou detekci objektů na obrázku při jejich malé vzdálenosti, kterou bohužel potvrzují i výsledná základní analytická data. Z tohoto důvodu byl zvolen alternativní, poloautomatický přístup získání dat, kdy část snímků byla analyzována v prostředí programu MatLab a část dat byla analyzována vizuálně (přibližně 28 % snímků). Vzhledem k časové náročnosti tohoto přístupu byla obrazové analýze podrobena pouze vybraná měření – 62 622 snímků z původně pořízeného množství 572 544 snímků formátu „bmp“. Hodnoty relativních rychlostí byly počítány v programu Microsoft Excel s následným grafickým zpracováním v programu MatLab. Výsledky potvrzují domněnku, že relativní rychlost dvojice bublin je nejnižší při jejich minimální vzdálenosti. Průměrné hodnoty relativní rychlosti získané měřením stejného objemu bublin (50 μ L) v různých kapalinách nasvědčují tomu, že právě vlastnosti kapaliny mají vliv na relativní rychlost dvojice bublin. Jako významnější se jeví vliv viskozity oproti vlivu povrchového napětí, kdy relativní rychlost dvojice bublin exponenciálně klesá s její rostoucí hodnotou. Nejrychleji se bubliny velikosti 50 μ L pohybují v chloridu draselném a nejpomaleji v glycerínu. Experimentální data byla také zpracována do map hustot pravděpodobnosti výskytu dvojice bublin. Z těchto map lze vyvodit závěr, že bubliny velikosti 50 μ L se nejčastěji vyskytují vedle sebe, přičemž nejdále od sebe se drží bubliny v roztoku glycerínu a nejbližší k sobě se vyskytují ve fosforečnanu trisodném. Na základě omezení vyhodnocení experimentálních měření pouze na bubliny o velikosti 50 μ L nebylo možné stanovit vliv velikosti bublin na relativní rychlost dvojice bublin, popř. na jejich vzájemnou pozici.

7 Závěr

Předmětem zaměření diplomové práce bylo experimentální stanovení relativní rychlosti dvojice bublin pohybujících se v protiproudu různých kapalin. Tyto rychlosti byly vyhodnoceny na základě zpracování pořízeného obrazového záznamu pohybu dvojice bublin v originální aparatuře.

Při vyhodnocení experimentálních dat došlo k neočekávanému problému ve správné funkčnosti užitého programu, na jehož základě byl zvolen alternativní přístup vyhodnocení dat, s omezením na část experimentálních měření. Ze získaných výsledků lze konstatovat, že faktor mající významnější vliv na chování dvojice bublin pohybujících se v kapalině (na jejich relativní rychlost i vzájemnou pozici), je viskozita kapaliny. Tomuto závěru odpovídají i závěry uváděné v literatuře.

Na základě redukováného množství vyhodnocených dat bych samotné závěry označila jako předběžné. Pro jejich validaci a další měření na této aparatuře opírající se o analýzu obrazu doporučuji odstranění chyb ve stávajícím kódu (viz kapitola 4.3.2; v případě, že se nejedná o chybu ve vestavěných funkcích samotného programu MatLab), popř. přechod k jiným softwarovým zařízením. Opravě užitého kódu se tato práce nevěnuje z důvodu velkého přesahu do oblasti programování.

Závěrem lze říci, že stanovených cílů diplomové práce bylo dosaženo, přestože v menším rozsahu, než bylo plánováno.

8 Seznam symbolů a zkratek

Bezrozměrná kritéria

Re	Reynoldsovo kritérium	(-)
We	Weberovo kritérium	(-)
Ca	Kapilární kritérium	(-)
Mo	Mortonovo kritérium	(-)
Fr	Froudeho kritérium	(-)
St	Strouhalovo kritérium	(-)
Ta	Tadakiho kritérium	(-)
C_D	Odporový koeficient	(-)

Fyzikální veličiny

ρ	Hustota kapaliny	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
u	Rychlost proudící tekutiny	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
d	Charakteristický rozměr	(m)
μ	Dynamická viskozita	($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
ν	Kinematická viskozita	($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
σ	Povrchové napětí	($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
g	Gravitační zrychlení	($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
f	Frekvence uvolňování vírů kolem tělesa	(s^{-1})
κ	Měrná vodivost roztoku	($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
ω	Úhlová rychlost	($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
f_{RPS}	Otáčky míchadla	($\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$)
v	Rychlost bubliny	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
v_{rel}	Relativní rychlost bubliny	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Dolní indexy

L	kapalina
G	plyn
B	bublina
M	míchadlo
k	korigovaná hodnota

9 Seznam obrázků

Obrázek 1. Simulace tvaru vyplouvající bubliny při různých hodnotách Reynoldsova čísla [8].....	5
Obrázek 2. Tvar bubliny vyjádřený excentricitou v závislosti na Weberově čísle pro vodu (a.) a pro glycerín (b.) [10].	6
Obrázek 3. Simulace tvaru bubliny jako funkce Reynoldsova a Bondova čísla [15].....	8
Obrázek 4. Grafická závislost Strouhalova kritéria [17].	9
Obrázek 5. Závislost odporového koeficientu na Reynoldsově čísle [21].	11
Obrázek 6. Závislost konduktivity na koncentraci, resp. hmotnostním zlomku, pro zředěné (a) a koncentrované (b) roztoky [25].	17
Obrázek 7. Obvyklé tvary bublin v proudící tekutině [21].....	20
Obrázek 8. Tvar bublin v karboxymethylcelulóze (1.5%; a.) a v glycerínu (97.0%; b.) v různém čase pro různé průměry otvorů ($D_0=2.4\text{mm}$) [33].	21
Obrázek 9. Bezrozměrný objem bublin jako funkce poměru průtoku kapalně a plynné fáze [36].....	21
Obrázek 10. Etapy koalescence [37].....	22
Obrázek 11. Průběh rozpadu bubliny [37].....	22
Obrázek 12. Závislost absolutní rychlosti vyplouvání bubliny na průměru bubliny (1) pro různou šířku kanálu (2) a rychlost proudění tekutiny (3) [17].....	23
Obrázek 13. Trajektorie vyplouvajících bublin ve stacionární kapalině o různé velikosti (d_b) aplikovaných z různě velkých trysek (D_0) [10].	24
Obrázek 14. Pohyb bubliny z oblasti úplavu, směr rotace a působení driftové síly [41]. ...	26
Obrázek 15. Schéma experimentální aparatury..	27
Obrázek 16. Zařízení pro aplikaci bublin. [6].....	28
Obrázek 17. Přímý a zrcadlový pohled na kuželový kanál (a.). Zobrazení vzájemného postavení dvou bublin v 3D projekci (b.) [6].....	29
Obrázek 18. Ubbelohde kapilární viskozimetr [42].....	31
Obrázek 19. Tenzimetr KRÜSS K100 MK2/SF/C [43].	32

Obrázek 20. Pt – Ir kroužek pro měření povrchového napětí [43].	33
Obrázek 21. Platinový háček a standard z křemíku pro měření hustoty [43].	34
Obrázek 22. Vytvořené pozadí a originální první snímek experimentální měření.	35
Obrázek 23. Binární zobrazení originálního snímku.	36
Obrázek 24. Původní $([0, 0])$ a nový $([0', 0'])$ souřadný systém pro přepočtení souřadnic bublin z pixelů na milimetry vzhledem k ose kuželovitého kanálu a detekce bublin na obrázku.....	36
Obrázek 25. Úvodní část kódu v programu MatLab.	37
Obrázek 26. Analytická tabulka s polohami dvojice bublin zaznamenaná v pixelech.....	37
Obrázek 27. Příklady chybné detekce čtyř bublin v průběhu experimentálního měření.	38
Obrázek 28. Analytická tabulka s chybným záznamem polohy dvojice bublin zaznamenaná v pixelech.....	39
Obrázek 29. Změna relativní rychlosti dvojice bublin s časem pro destilovanou vodu a objem bublin 50 μ L.....	41
Obrázek 30. Změna relativní rychlosti dvojice bublin s dynamickou viskozitou použitých kapalin.....	42
Obrázek 31. Změna relativní rychlosti dvojice bublin s povrchovým napětím použitých kapalin.....	43
Obrázek 32. Zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální vzdálenosti.	43
Obrázek 33. Zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich vertikální vzdálenosti.	44
Obrázek 34. Mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin o velikosti 50 μ L v destilované vodě.....	45
Obrázek 35. Změna radiální vzdálenosti dvojice bublin s povrchovým napětím.....	46
Obrázek 36. Změna vertikální vzdálenosti dvojice bublin s povrchovým napětím.....	46
Obrázek 37. Změna radiální vzdálenosti dvojice bublin s dynamickou viskozitou.	47
Obrázek 38. Změna vertikální vzdálenosti dvojice bublin s dynamickou viskozitou.	47

10 Seznam tabulek

Tabulka 1. Vybrané korelace odporového koeficientu, $C_d(Re)$ [19].....	11
Tabulka 2. Technické parametry užitého čerpadla.	28
Tabulka 3. Vybrané technické parametry externí chladicí jednotky Frigera CHV 1.7	29
Tabulka 4. Technické parametry použité rychloběžné kamery Olympus (i-SPEED 2).	30
Tabulka 5. Specifika použitých viskozimetrů.....	32
Tabulka 6. Parametry použitých kapalin a měřených velikostí dvojice bublin.	34
Tabulka 7. Přehled vyhodnocených experimentálních měření se zastoupením ručně vyhodnocených snímků (x).....	40
Tabulka 8. Přehled rychlostí každé bubliny o velikosti 50 μ L před a po korekci rotace kapaliny.....	43
Tabulka 9. Radiální a vertikální vzdálenosti bublin vzhledem k jejich průměru ($d_B=0,00457m$).....	45

11 Citovaná literatura

- [1] NI-IMAQ for USB Cameras [online]. USA, Austin: National instruments, © 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.ni.com/example/30030/en/>
- [2] Image Processing Toolbox [online]. United Kingdom: The MathWorks, © 2016 [cit. 2016 04 01]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/image/?requestedDomain=www.mathworks.com>
- [3] Open CV [online]. USA: Itseez, © 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://opencv.org/>
- [4] Software products and custom development in the fields of image processing and analysis [online]. France: ADCIS SA, © 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.adcis.net/en/Image-Processing-And-Analysis-Software-And-Custom-Engineering-Developments.html>
- [5] RUZICKA, M. C. On dimensionless numbers. Chemical Engineering Research and Design [online]. 2008, 86(8), 835–868 [cit. 2016-02-07]. DOI: 10.1016/j.cherd.2008.03.007. ISSN 02638762. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263876208000725>
- [6] VEČEŘ, Marek. Dynamika bublin vyplouvajících v protiproudu kapaliny. Ostrava, 2012. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [7] REYNOLDS, O. An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels. Philosophical Transactions of the Royal Society of London [online]. 1883, 174(0), 935–982 [cit. 2016-02-07]. DOI: 10.1098/rstl.1883.0029. ISSN 02610523. Dostupné z: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rstl.1883.0029>
- [8] LIU, Jingru, Chunying ZHU, Xiaoda WANG, Taotao FU, Youguang MA a Huaizhi LI. Three-dimensional numerical simulation of coalescence and interactions of multiple horizontal bubbles rising in shear-thinning fluids. AIChE Journal [online]. 2015, 61(10), 3528–3546 [cit. 2015 11 30]. DOI: 10.1002/aic.14874. ISSN 00011541. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.14874>
- [9] REVUELTA, Antonio, Javier RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ a Carlos MARTÍNEZ-BAZÁN. On the breakup of bubbles at high Reynolds numbers and subcritical Weber

numbers. *European Journal of Mechanics – B/Fluids* [online]. 2008, 27(5), 591–608 [cit. 2016-02-07]. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2007.10.004. ISSN 09977546. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0997754607000970>

[10] LIU, Liu, Hongjie YAN a Guojian ZHAO. Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2015, 62, 109–121 [cit. 2015-11-30]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.11.018. ISSN 08941777. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177714003136>

[11] SMUTNÁ, Kateřina. Periodický pohyb a štěpení elipsoidálních bublin. Ostrava, 2009. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

[12] VRIES, Antoine. Path and wake of a Rising Bubble. Enschede, 2001. University of Twente.

[13] SMOLIANSKI, Anton, Heikki HAARIO a Pasi LUUKKA. Numerical study of dynamics of single bubbles and bubble swarms. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2008, 32(5), 641–659 [cit. 2016-02-07]. DOI: 10.1016/j.apm.2007.01.004. ISSN 0307904x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0307904X07000315>

[14] CHATTERJEE, Jaideep. Critical Eotvos numbers for buoyancy-induced oil drop detachment based on shape analysis. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2002, 98(3), 265–283 [cit. 2016-02-07]. DOI: 10.1016/S0001-8686(01)00098-7. ISSN 00018686. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868601000987>

[15] HUA, Jinsong a Jing LOU. Numerical simulation of bubble rising in viscous liquid. *Journal of Computational Physics* [online]. 2007, 222(2), 769–795 [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1016/j.jcp.2006.08.008. ISSN 00219991. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021999106003949>

[16] JONÁŠ, Pavel. Strouhalovo číslo a jeho význam v mechanice tekutin. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 2001, 46(2), 119–127 [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/141072>

[17] BÖHM, Lutz, Tokihiro KURITA, Katsuki KIMURA a Matthias KRAUME. Rising behaviour of single bubbles in narrow rectangular channels in Newtonian and non-Newtonian liquids. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2014, 65, 11–23 [cit. 2015-11-30]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.05.001. ISSN 03019322. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932214000731>

- [18] CELATA, Gian, Francesco D'ANNIBALE, Paolo DI MARCO, Gianluca MEMOLI a Akio TOMIYAMA. Measurements of rising velocity of a small bubble in a stagnant fluid in one- and two-component systems. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2007, 31(6), 609–623 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2006.06.006. ISSN 08941777. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177706000975>
- [19] NGUYEN, Anh a Hans SCHULZE. *Colloidal science of flotation*. 10. New York: Marcel Dekker, 2004, xix, 850 p. ISBN 08-247-4782-8.
- [20] RAŠKA, Miroslav. *Studium chování dvojice bublin unášených v protiproudu kapaliny*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.
- [21] R. CLIFT, J. Bubbles, drops, and particles. Unabridged republ. of the work 1st publ. by Acad. Press, New York, 1978. Mineola, NY: Dover Pub, 1978. ISBN 0486445801.
- [22] Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola: *Laboratorní technika* [online]. Hradec Králové, [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://lat.zshk.cz/vyuka/mereni-hustoty.aspx>
- [23] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření*. Ostrava, 2010. Vysoká škola báňská – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [24] BRONCOVÁ, Gabriela, Martin KRONĎÁK a Martin ČLUPEK. In-situ měření pH, vodivosti a kyslíku ve štolě Josef: pracovní text pro Podzemní výukové středisko JOSEF. In: Ústav analytické chemie VŠCHT Praha [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2010 [cit. 2016 03 30]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/anl/josef/LA_CH2/NAVODY_pH_vodivost_kyslik.pdf
- [25] MACHÁČ, Jiří. Měření koncentrace roztoků pomocí elektrické vodivosti. In: Ústav fyziky a měřicí techniky: Laboratoře z měřicí a řídicí techniky [online]. b.r. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/E3-Elektricka%20vodivost%20kapalin.pdf>
- [26] MACEŠKA, Radek. *Měření vodivosti kapalin*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] MAŠLÁŇ, Stanislav. *Měření vodivosti kapalin*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

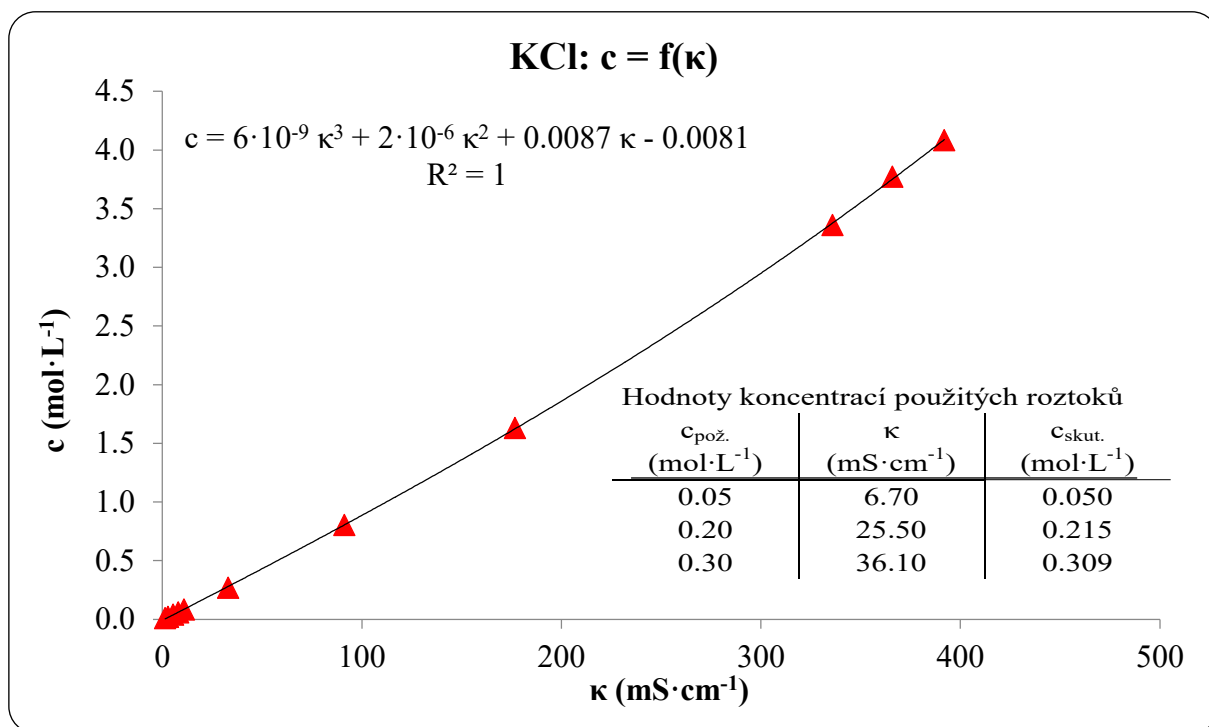
- [28] DRÁBKOVÁ, Sylva. Mechanika tekutin. První. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2008, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [29] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. Měření povrchového a mezifázového napětí. Co je co v povrchové a koloidní chemii [online]. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/ebook.help.htm
- [30] BESAGNI, Giorgio a Fabio INZOLI. Bubble size distributions and shapes in annular gap bubble column. Experimental Thermal and Fluid Science [online]. 2016, 74, 27–48 [cit. 2016-03-01]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.11.020. ISSN 08941777. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089417771500343X>
- [31] AOYAMA, S., K. HAYASHI, S. HOSOKAWA a A. TOMIYAMA Shapes of ellipsoidal bubbles in infinite stagnant liquids. International Journal of Multiphase Flow [online]. 2016, 79, 23–30 [cit. 2016-03-02]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.10.003. ISSN 03019322. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932215002256>
- [32] FAN, Wenyuan a Xiaohong YIN. Laser image measurement of twin bubbles formation in shear-thinning fluids. Optics Communications [online]. 2012, 285(19), 3926–3930 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.06.005. ISSN 00304018. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401812005160>
- [33] FAN, Wenyuan a Xiaohong YIN. Influence of orifice spacing on twin bubbles formation in shear-thinning fluids: Laser image measurement. Optik – International Journal for Light and Electron Optics [online]. 2014, 125(7), 1871–1874 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1016/j.ijleo.2013.10.034. ISSN 00304026. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402613013806>
- [34] FAN, Wenyuan a Xiaohong YIN. Application of laser image technique for detection of detached volume of twin-bubble in semitransparent fluids. Optik – International Journal for Light and Electron Optics [online]. 2016, [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.02.003. ISSN 00304026. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402616300481>
- [35] KULKARNI, Amol a Jyeshtharaj JOSHI. Bubble Formation and Bubble Rise Velocity in Gas–Liquid Systems: A Review. Industrial & Engineering Chemistry Research [online]. 2005, 44(16), 5873–5931 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1021/ie049131p. ISSN 08885885. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie049131p>

- [36] LU, Yutao, Taotao FU, Chunying ZHU, Youguang MA a Huai LI Scaling of the bubble formation in a flow-focusing device: Role of the liquid viscosity. *Chemical Engineering Science* [online]. 2014, 105, 213–219 [cit. 2016-03-16]. DOI: 10.1016/j.ces.2013.11.017. ISSN 00092509. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250913007525>
- [37] KARN, Ashish, Siyao SHAO, Roger ARNDT a Jiarong HONG. Bubble coalescence and breakup in turbulent bubbly wake of a ventilated hydrofoil. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2016, 70, 397–407 [cit. 2016-03-21]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.10.003. ISSN 08941777. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177715002794>
- [38] KOLMOGOROV, A. On the breakage of drops in a turbulent flow. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1949, (66), 825–828.
- [39] MUKIN, R. V. Modeling of bubble coalescence and break-up in turbulent bubbly flow. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 2014, 62, 52–66 [cit. 2016-03-21]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.02.008. ISSN 03019322. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932214000433>
- [40] HASSAN, N., KHAN, M. M. K a RASUL, M. G. A Study of Bubble Trajectory and Drag Co-efficient in Water and NonNewtonian Fluids. *WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS* [online]. 2008, 3(3), 261–270 [cit. 2016-03-22]. ISSN 1790-5087. Dostupné z: <http://wseas.us/e-library/transactions/fluid/2008/MGR-08.pdf>
- [41] WICHTERLE, Kamil, Pavel RAŠKA a Marek VEČEŘ. Bubbles rising in non-uniform velocity field. In: *Proceedings*. Bratislava: Slovak Society of Chemical Engineering, 2008, s. 14. ISBN 978-80-2272-903-1. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~wih15/Publikace/CHIS_A08TwinFtx.pdf
- [42] JANUŠ, Petr. Studium viskozity kapalných materiálů. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [43] KRÜSS GmbH [online]. Germany, [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.kruss.de/>
- [44] KRÜSS Tensiometer K100 MK2/SF/C: Instruction Manual V2-05. Art.-Nr. 12884. Hamburg, 2001–2005.

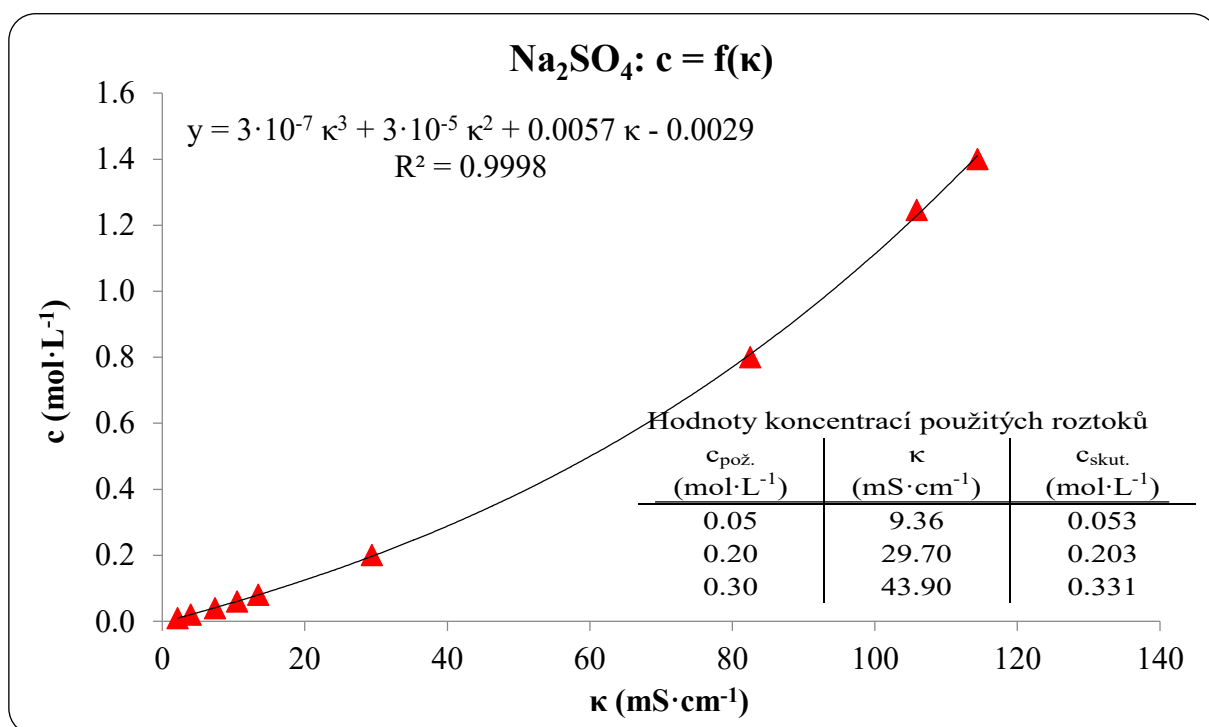
12 Seznam příloh

Příloha 1. Grafická závislost koncentrace roztoků KCl na vodivosti.	61
Příloha 2. Grafická závislost koncentrace roztoků Na ₂ SO ₄ na vodivosti.	61
Příloha 3. Grafická závislost koncentrace roztoků Na ₃ PO ₄ na vodivosti..	62
Příloha 4. Grafická závislost koncentrace roztoků Mg(NO ₃) ₂ na vodivosti.	62
Příloha 5. Záznam z laboratorního deníku.	63
Příloha 6. Butanol, objem bublin 50μL..	64
Příloha 7. Glycerín, objem bublin 50μL.	65
Příloha 8. KCl, objem bublin 50μL..	66
Příloha 9. Na ₂ SO ₄ , objem bublin 50μL.....	67
Příloha 10. Na ₃ PO ₄ , objem bublin 50μL.....	68
Příloha 11. Mg(NO ₃) ₂ , objem bublin 50μL.	69
Příloha 12. Závislost poměru vzdáleností těžišť a ekvivalentního průměru velikosti bublin na Reynoldově, Weberově a Eötvösově kritériu.	70
Příloha 13. Závislost odporového koeficientu na Reynoldsově kritériu.....	70

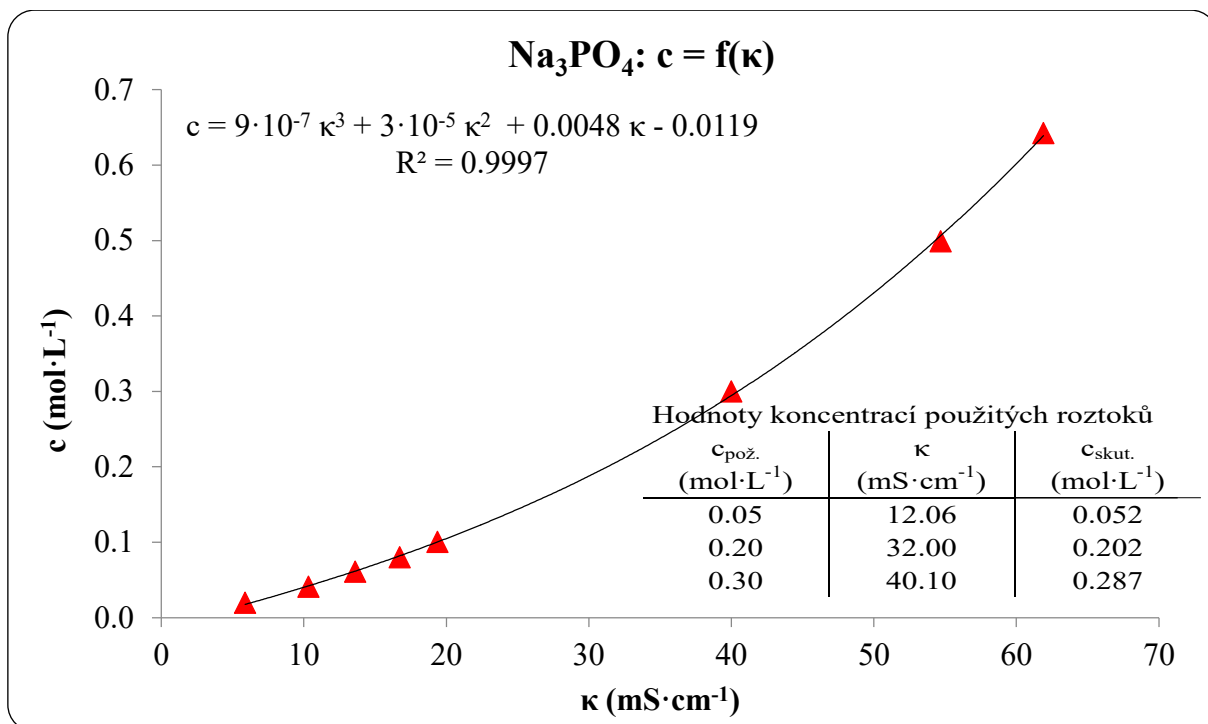
13 Přílohy



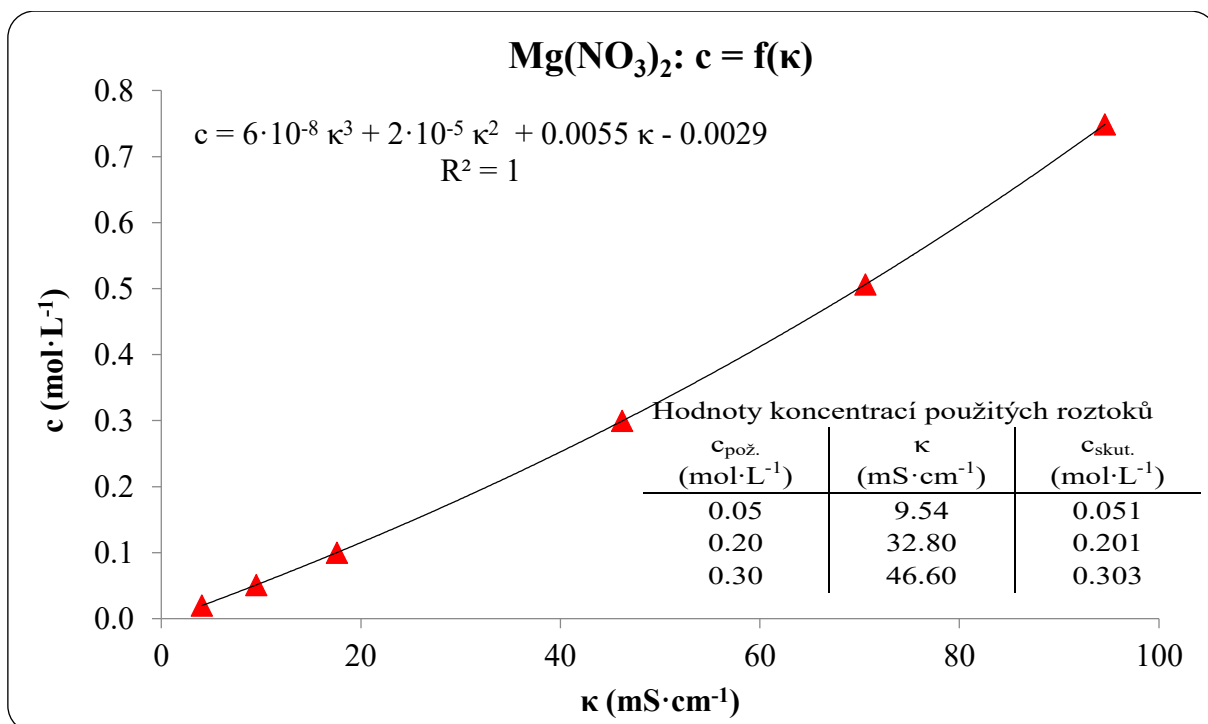
Příloha 1. Grafická závislost koncentrace roztoků KCl na vodivosti pro stanovení přesné koncentrace roztoků použitých pro měření v laboratorní aparatuře.



Příloha 2. Grafická závislost koncentrace roztoků Na₂SO₄ na vodivosti pro stanovení přesné koncentrace roztoků použitých pro měření v laboratorní aparatuře.



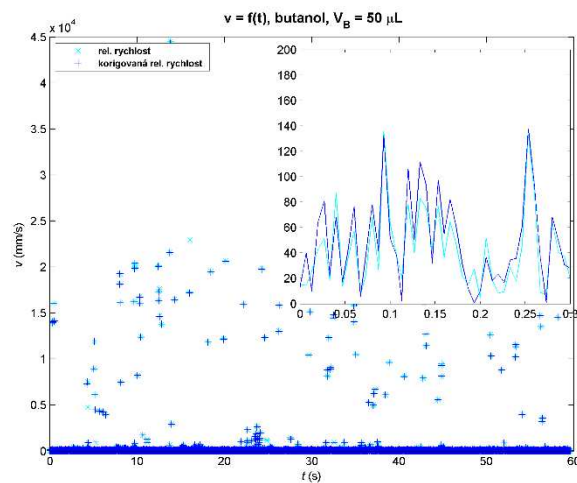
Příloha 3. Grafická závislost koncentrace roztoků Na₃PO₄ na vodivosti pro stanovení přesné koncentrace roztoků použitých pro měření v laboratorní aparatuře.



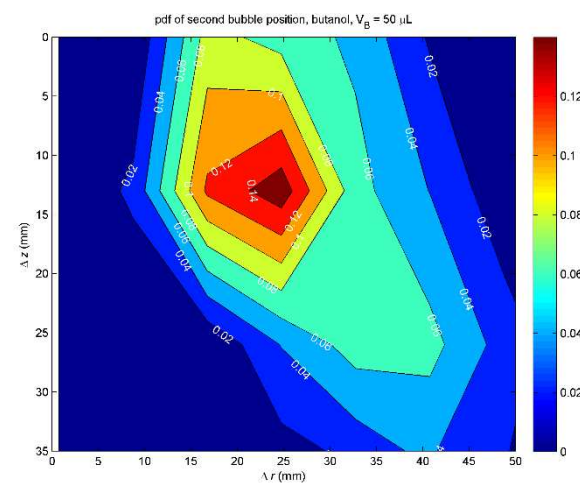
Příloha 4. Grafická závislost koncentrace roztoků Mg(NO₃)₂ na vodivosti pro stanovení přesné koncentrace roztoků použitých pro měření v laboratorní aparatuře.

	parametry experimentálního měření						parametry kamery				adresář
	c	t	n	V _b	Q _{kap.}	Otáčky míchadla	Rychlost snímání	Čas expozice	Clona	Ohnisko	
	(mol·L ⁻¹)	(°C)	(-)	(mL)	(dm ³ ·min ⁻¹)	(rps)	(fps)	(S)	(-)	(mm)	
Voda		22.2	2.0	150.0	22.2	0.2790817	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x150
		22.2	2.0	100.0	28.2	0.3147321	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x100
		19.3	2.0	125.0	28.0	0.3534546	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x125
		20.1	2.0	175.0	27.6	0.3656040	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x175
		21.0	2.0	200.0	28.1	0.3463692	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x200
		21.8	2.0	75.0	25.2	0.2830235	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x75
		21.5	2.0	50.0	24.8	0.2861375	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x50
		20.8	2.0	25.0	22.8	0.2407435	150.0	1/300	11-8	50.0	Voda_2x25
KCl	0.05	21.3	2	200	24.3	0.2607988	150	1/300	11-8	50	KCl_0.05M_2x200
		21.3	2	150	26.8	0.2696878	150	1/300	11-8	50	KCl_0.05M_2x150
		21.2	2	100	26.5	0.2983397	150	1/300	11-8	50	KCl_0.05M_2x100
		21.2	2	50	22.8	0.2743276	150	1/300	11-8	50	KCl_0.05M_2x50
	0.2	21.2	2	200	23.4	0.3075809	150	1/300	11-8	50	KCl_0.2M_2x200
		21.1	2	150	19.5	0.3359332	150	1/300	11-8	50	KCl_0.2M_2x150
		21.1	2	100	18.8	0.2852010	150	1/300	11-8	50	KCl_0.2M_2x100
		21.2	2	50	18.5	0.2713129	150	1/300	11-8	50	KCl_0.2M_2x50
	0.3	21.3	2	200	21.3	0.2523019	150	1/300	11-8	50	KCl_0.3M_2x200
		21.0	2	150	21.7	0.1718098	150	1/300	11-8	50	KCl_0.3M_2x150
		21.3	2	100	22.9	0.2295700	150	1/300	11-8	50	KCl_0.3M_2x100
		21.0	2	50	22.7	0.2322731	150	1/300	11-8	50	KCl_0.3M_2x50
Na ₂ SO ₄	0.05	20.6	2	200	25.4	0.2600947	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.05M_2x200
		20.8	2	150	27.1	0.2905980	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.05M_2x150
		20.6	2	100	24.5	0.2533310	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.05M_2x100
		20.7	2	50	23.4	0.2444162	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.05M_2x50
	0.2	21.5	2	200	26.5	0.2498864	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.2M_2x200
		21.2	2	150	23.6	0.2734660	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.2M_2x150
		20.9	2	100	22.8	0.2654790	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.2M_2x100
		21.2	2	50	23.2	0.2800812	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.2M_2x50
	0.3	21.7	2	200	26.5	0.2844341	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.3M_2x200
		21.0	2	150	24.5	0.2840538	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.3M_2x150
		21.5	2	100	25.8	0.2968015	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.3M_2x100
		20.5	2	50	27.5	0.3042565	150	1/300	11-8	50	Na ₂ SO ₄ _0.3M_2x50
Na ₃ PO ₄	0.05	21.6	2	200	25.6	0.2762476	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.05M_2x200
		21.8	2	150	24.2	0.2982488	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.05M_2x150
		21.7	2	100	26.7	0.2480989	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.05M_2x100
		21.2	2	50	22.7	0.3261095	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.05M_2x50
	0.2	22.7	2	200	26.7	0.2860871	150	1/300	8	50	Na ₃ PO ₄ _0.2M_2x200
		21.5	2	150	25.5	0.2718302	150	1/300	8	50	Na ₃ PO ₄ _0.2M_2x150
		20.7	2	100	25.5	0.2598081	150	1/300	8	50	Na ₃ PO ₄ _0.2M_2x100
		21.0	2	50	23.8	0.2672597	150	1/300	8	50	Na ₃ PO ₄ _0.2M_2x50
	0.3	22.2	2	200	23.8	0.2340723	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.3M_2x200
		21.0	2	150	24.5	0.2306354	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.3M_2x150
		20.5	2	100	22.6	0.2611058	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.3M_2x100
		21.0	2	50	21.6	0.2475930	150	1/300	5.6	50	Na ₃ PO ₄ _0.3M_2x50
Mg(NO ₃) ₂	0.05	21.1	2	200	25.6	0.2960441	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.05M_2x200
		20.5	2	150	25.5	0.2588918	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.05M_2x150
		21.1	2	100	23.1	0.2360146	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.05M_2x100
		20.5	2	50	22.8	0.2687508	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.05M_2x50
	0.2	20.5	2	200	26.8	0.2273037	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.2M_2x200
		20.5	2	150	22.3	0.2779611	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.2M_2x150
		20.5	2	100	22.7	0.2568032	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.2M_2x100
		21.5	2	50	22.3	0.3024929	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.2M_2x50
	0.3	20.6	2	200	22.2	0.3364243	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.3M_2x200
		20.1	2	150	25.7	0.3128448	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.3M_2x150
		20.8	2	100	24.8	0.2934268	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.3M_2x100
		20.5	2	50	24.5	0.3541936	150	1/300	5.6	50	Mg(NO ₃) ₂ _0.3M_2x50
Butanol		22.5	2.0	75.0	21.5	0.2470511	150.0	1/300	8.0	50.0	Butanol_2x75
		21.4	2.0	50.0	21.6	0.2753617	150.0	1/300	8.0	50.0	Butanol_2x50
		21.8	2.0	25.0	21.2	0.2482752	150.0	1/300	8.0	50.0	Butanol_2x25
Glycerin		23.0	2.0	150.0	24.3	0.3211885	150.0	1/300	8.0	50.0	Glycerin_2x150
		23.0	2.0	100.0	22.8	0.3484400	150.0	1/300	8.0	50.0	Glycerin_2x100
		22.0	2.0	50.0	22.8	0.3146220	150.0	1/300	8.0	50.0	Glycerin_2x50
		22.0	2.0	25.0	17.5	0.3456495	150.0	1/300	8.0	50.0	Glycerin_2x25
		22.0	2.0	75.0	24.5	0.3320802	150.0	1/300	8.0	50.0	Glycerin_2x75

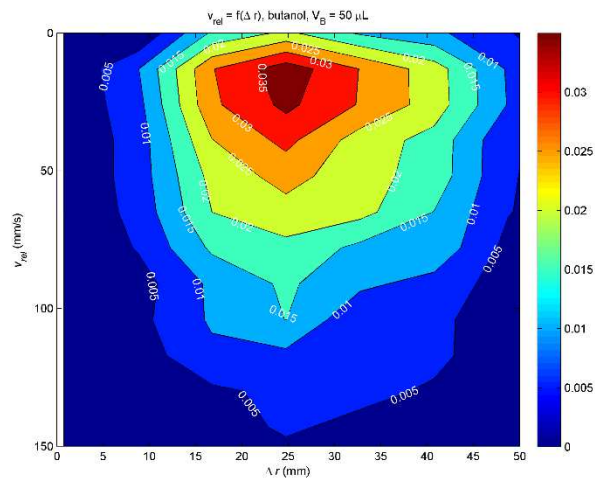
Příloha 5. Záznam z laboratorního deníku.



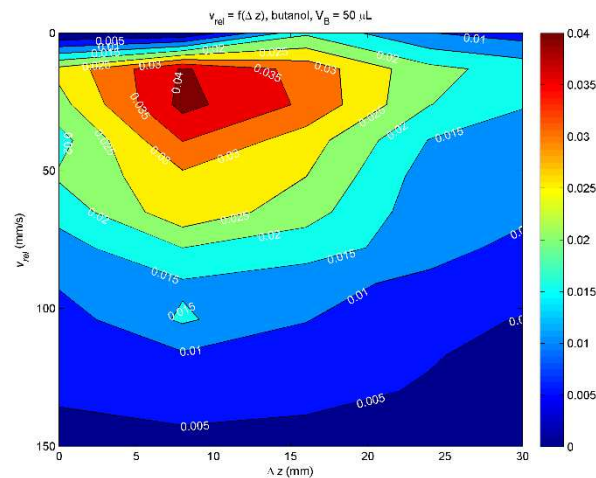
a.



b.

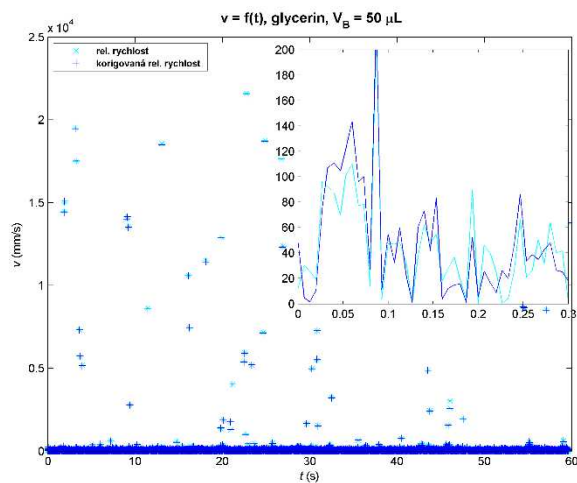


c.

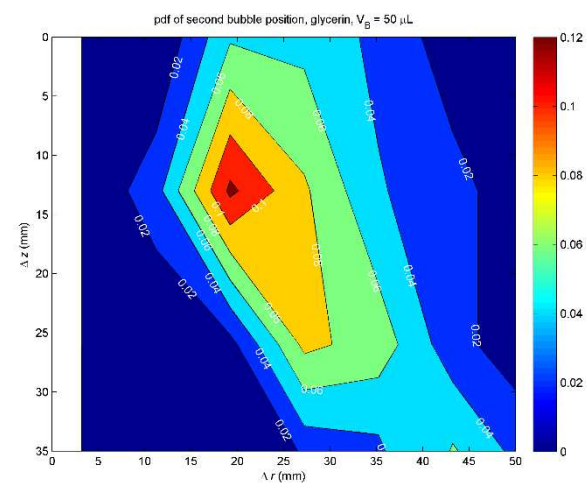


d.

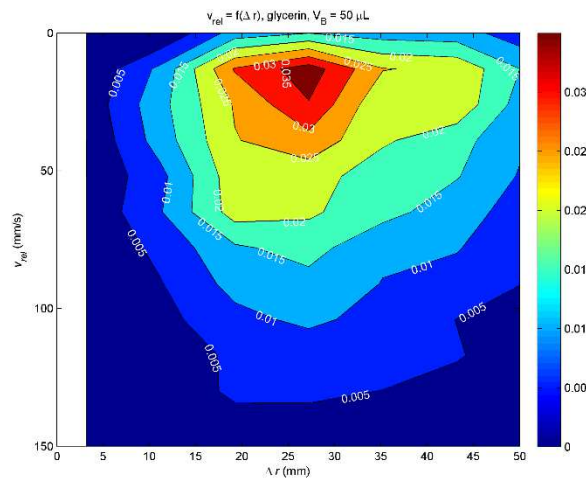
Příloha 6. Butanol, objem bublin $50\mu\text{L}$: změna relativní rychlosti dvojice bublin s čase (a), mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin (b); zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální (c) a vertikální (d) vzdálenosti.



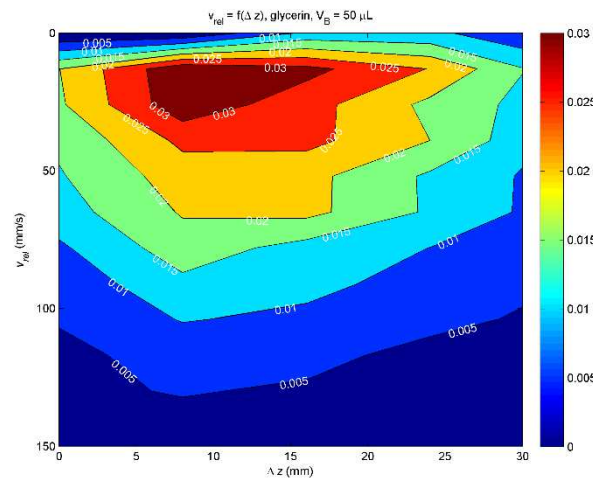
a.



b.

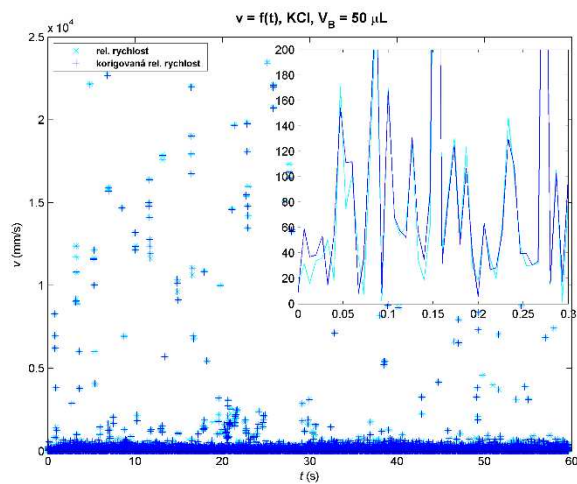


c.

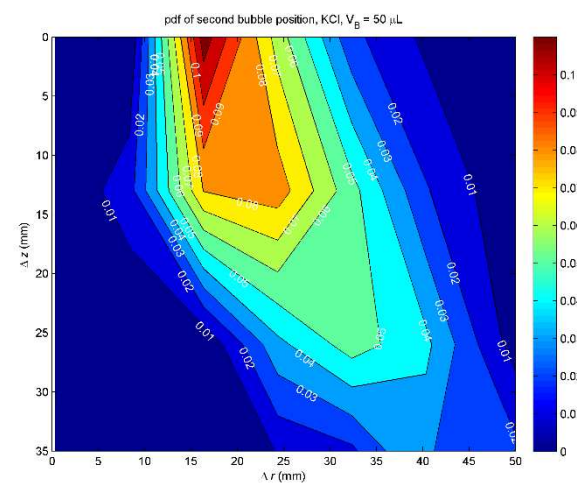


d.

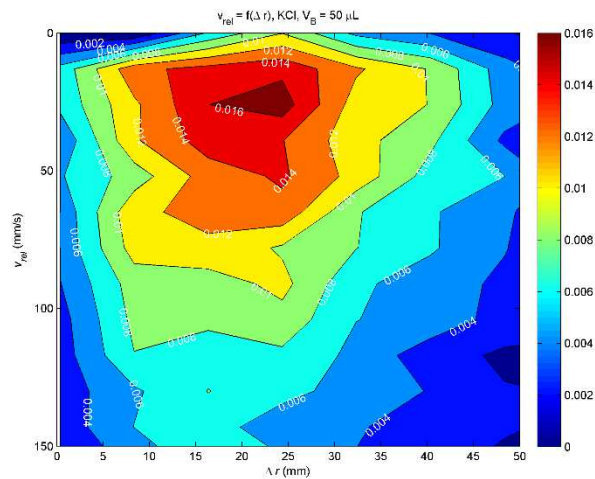
Příloha 7. Glycerin, objem bublin 50μL: změna relativní rychlosti dvojice bublin s časem (a), mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin (b); zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální (c) a vertikální (d) vzdálenosti.



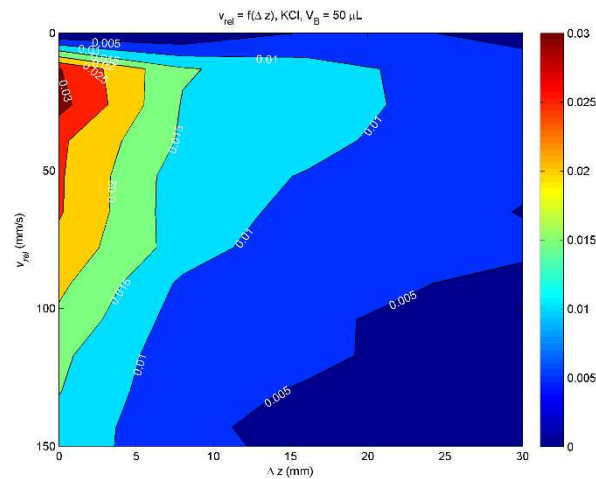
a.



b.

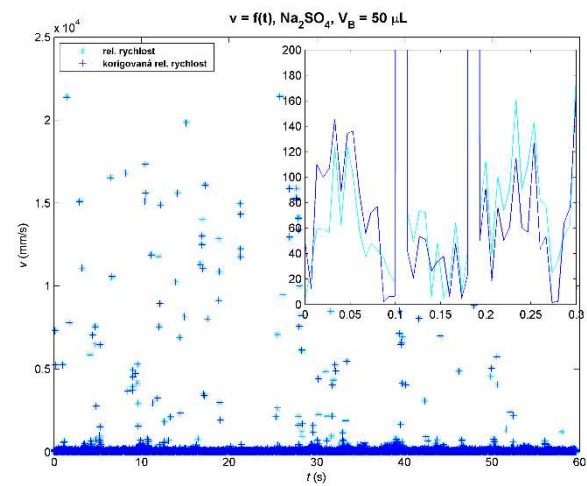


c.

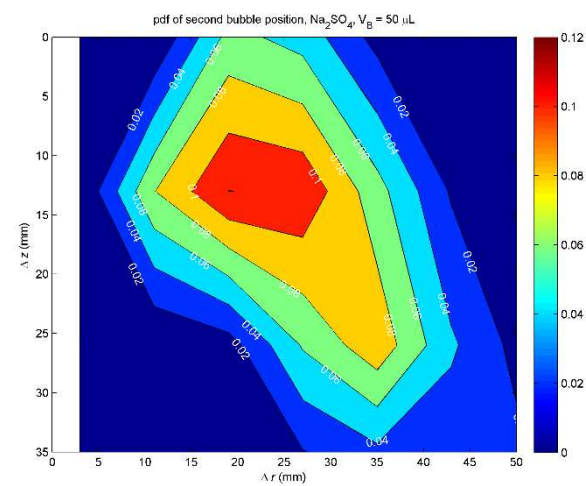


d.

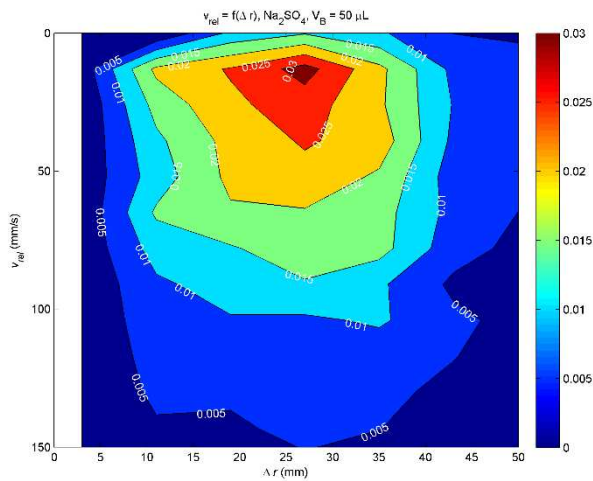
Příloha 8. KCl, objem bublin 50 μ L: změna relativní rychlosti dvojice bublin s čase (a), mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin (b); zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální (c) a vertikální (d) vzdálenosti.



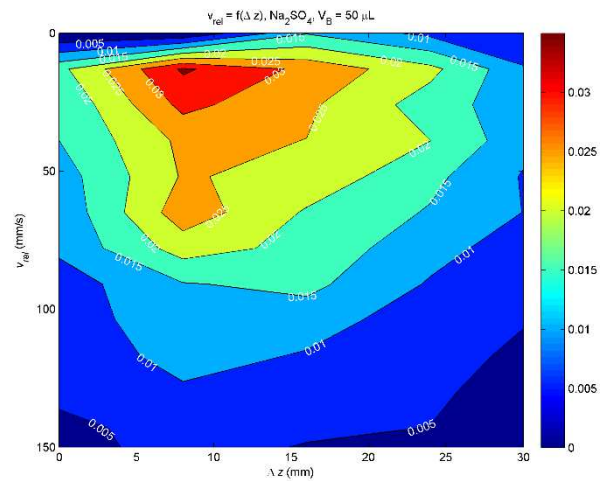
a.



b.

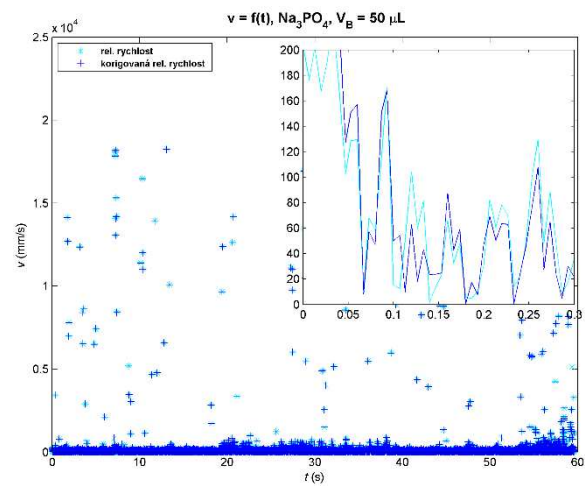


c.

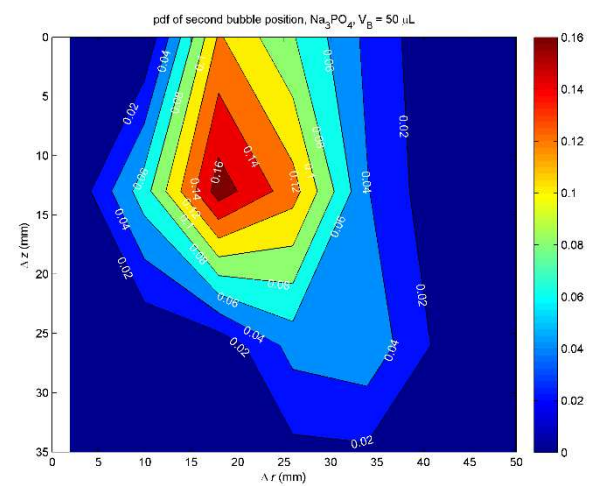


d.

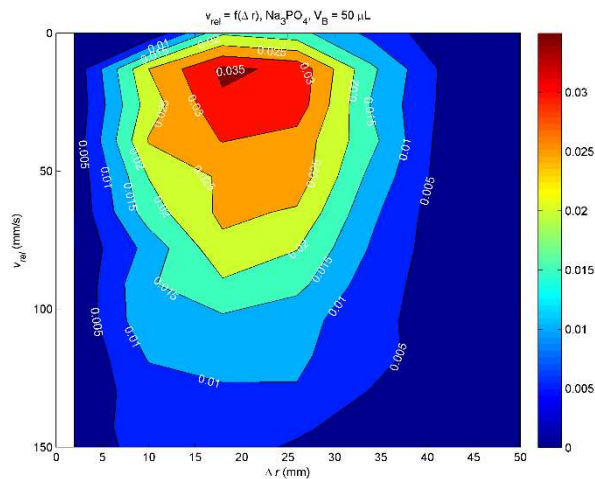
Příloha 9. Na_2SO_4 , objem bublin $50\mu\text{L}$: změna relativní rychlosti dvojice bublin s čase (a), mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin (b); zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální (c) a vertikální (d) vzdálenosti.



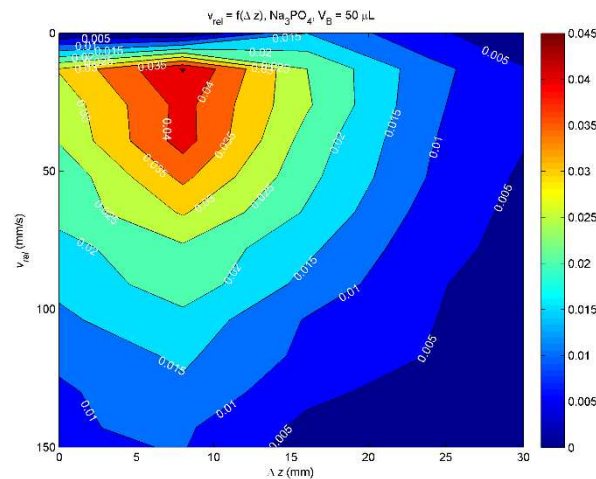
a.



b.

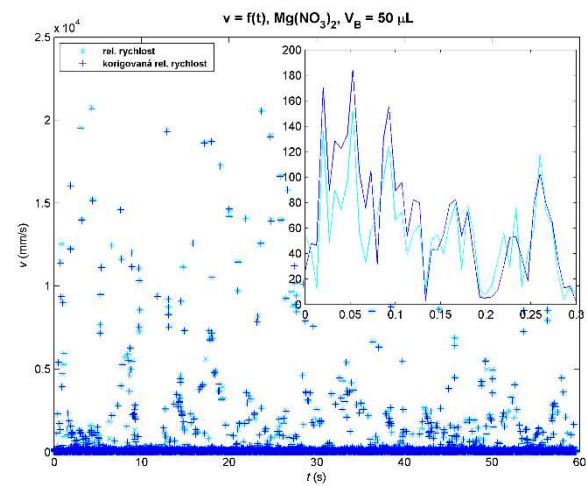


c.

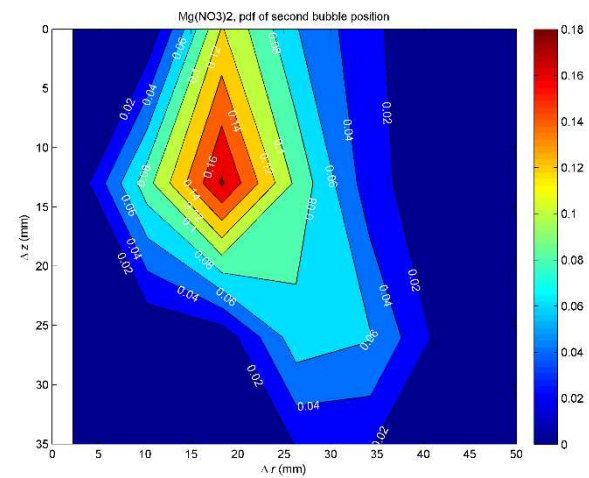


d.

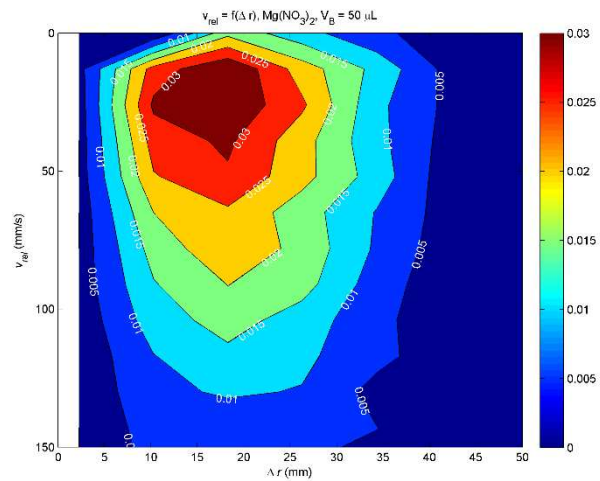
Příloha 10. Na_3PO_4 , objem bublin $50\mu\text{L}$: změna relativní rychlosti dvojice bublin s časem (a), mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin (b); zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální (c) a vertikální (d) vzdálenosti.



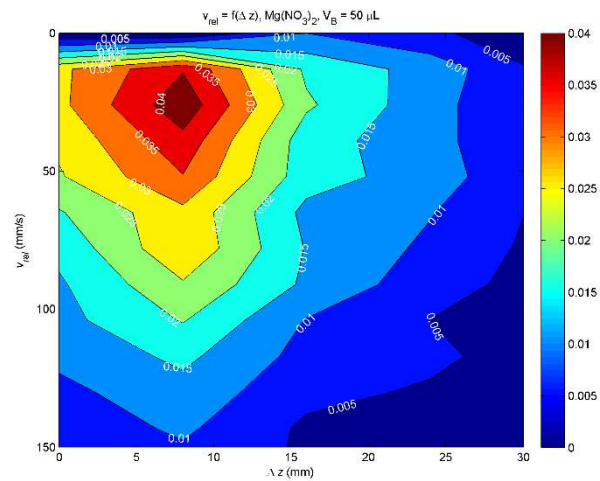
a.



b.

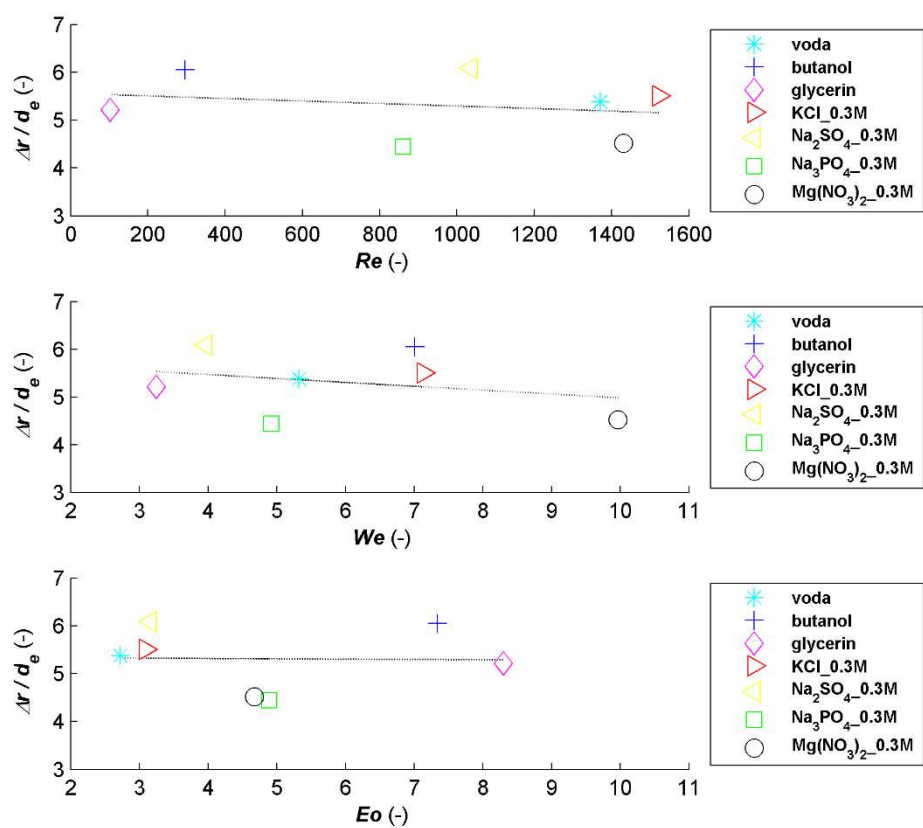


c.

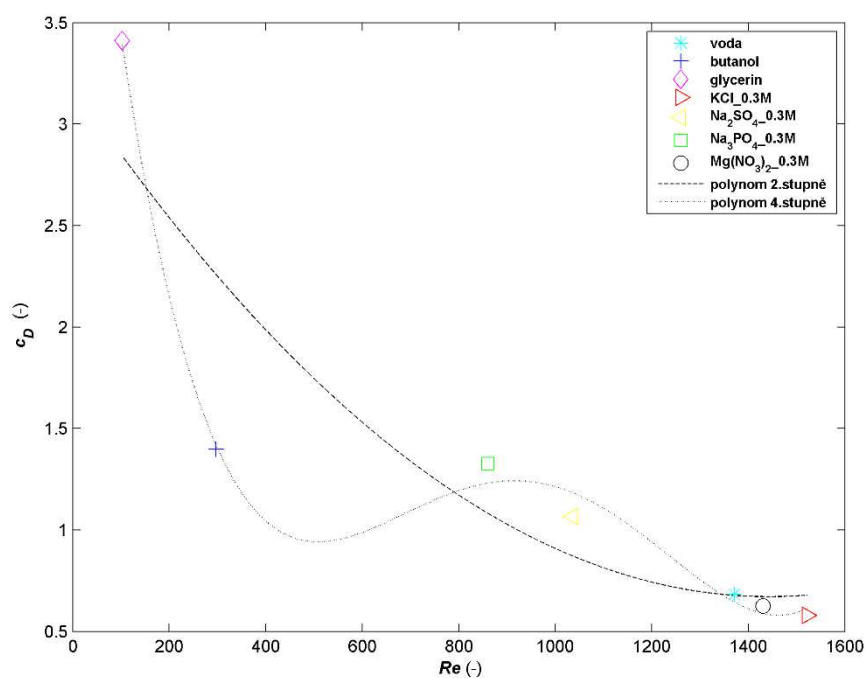


d.

Příloha 11. $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, objem bublin $50\mu\text{L}$: změna relativní rychlosti dvojice bublin s čase (a), mapa hustoty pravděpodobnosti vzájemného výskytu dvojice bublin (b); zastoupení relativní rychlosti dvojice bublin vzhledem k jejich radiální (c) a vertikální (d) vzdálenosti.



Příloha 12. Závislost poměru vzdáleností těžišť a ekvivalentního průměru velikosti bublin na Reynoldově, Weberově a Eötvösově kritériu.



Příloha 13. Závislost odporového koeficientu na Reynoldsově kritériu.